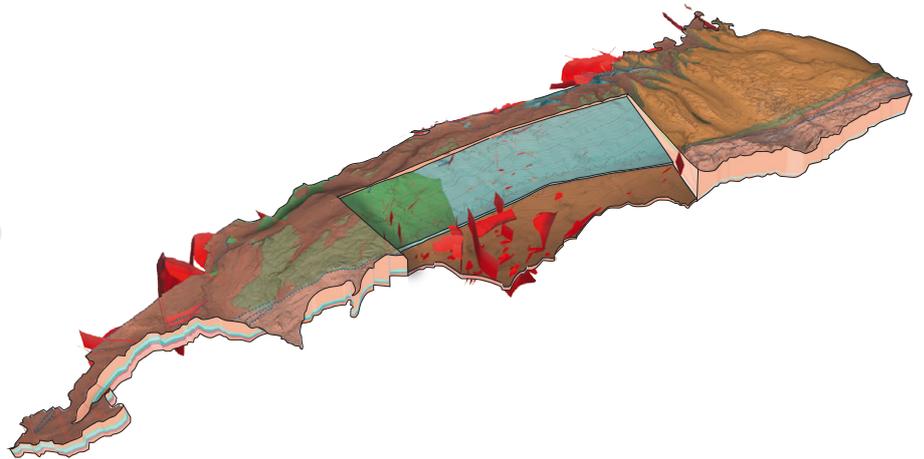


# GeoMol: Geologisches 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens – Schlussbericht



Berichte der Landesgeologie  
Rapports du Service géologique national  
Rapporti del Servizio geologico nazionale  
Reports of the Swiss Geological Survey

Robin Allenbach, Roland Baumberger, Eva Kurmann, C. Salomè Michael und Lance Reynolds



# GeoMol: Geologisches 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens – Schlussbericht

Berichte der Landesgeologie  
Rapports du Service géologique national  
Rapporti del Servizio geologico nazionale  
Reports of the Swiss Geological Survey

Robin Allenbach, Roland Baumberger, Eva Kurmann, C. Salomè Michael und Lance Reynolds



**Imprint**

GeoMol: Geologisches 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens – Schlussbericht

**Autoren (in alphabetischer Reihenfolge)**

Robin Allenbach, Roland Baumberger, Eva Kurmann, C. Salomè Michael und Lance Reynolds

**Mit Beiträgen von (in alphabetischer Reihenfolge)**

Bastien Delacou, Gennaro Di Tommaso, Mirjam Dürst Stucki, Pascal Kuhn, Maria Ponzio und Philip Wehrens.

**Französische Übersetzung**

Traductonet, Christian Marro

**Satz und Layout**

Bundesamt für Landestopografie swisstopo

**Druck**

Bundesamt für Landestopografie swisstopo

**Webseite**

<https://viewer.geomol.ch>

**Herausgeber**

© 2017, Bundesamt für Landestopografie, CH-3084 Wabern, [www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch). – Alle Rechte vorbehalten. Übersetzungen und analoge oder digitale Vervielfältigungen dieses Dokuments oder von Teilen davon, die nicht ausschliesslich dem privaten Eigengebrauch dienen, sind nur mit Erlaubnis des Herausgebers gestattet.

**Empfehlung für die Angabe in einem Literaturverzeichnis**

Swisstopo (2017): GeoMol: Geologisches 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens – Schlussbericht. – Ber. Landesgeol. 10 DE.

**Disclaimer**

Die in Bericht und 3D-Modell präsentierten Resultate wurden basierend auf der Interpretation von verschiedenen Daten (Seismik, Bohrungen, geologischen Karten und Profilen, usw.) unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Qualitäts- und Detaillierungsgrade erstellt. Die Grundlagedaten waren ursprünglich nicht aufeinander abgestimmt und benötigten daher weitere Vereinfachungen und Harmonisierungen. Weiter beeinflussten das geologische Wissen und der Hintergrund der verschiedenen Mitarbeiter die Modellentwicklung.

Das 3D-Modell stellt eine schnelle und einfache Möglichkeit zur Abfrage von geologischen Strukturen im Untergrund des Modellperimeters dar. Es stellt die Grundlagen bereit (1) zur Gewinnung eines Überblicks über den geologischen Untergrund des Molassebeckens, (2) zur groben Abschätzung sowohl von Höhenlage als auch Geometrie von verschiedenen lithostratigraphischen Horizonten sowie (3) zur Groblokalisierung der vorhandenen Störungszonen. Die Daten und Informationen aus dem 3D-Modell dürfen nicht als Ersatz für Expertenmeinungen, geologische Gutachten und/oder Begehungen aller Art verwendet und nur im Zusammenhang mit Expertengutachten zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

Dieser Bericht und die auf der Webseite des Projekts zugänglichen Informationen geben interessierten Personen und Institutionen Auskunft über das geologische 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens. In die Qualitätssicherung des 3D-Modells und des vorliegenden Berichts wurde viel Zeit und Aufwand investiert. Dennoch gibt es keine Garantie, dass die Interpretation an jedem Ort im Untergrund der Realität entspricht. Die Schweizerische Eidgenossenschaft und die Autoren sind unter keinen Umständen haftbar für jeglichen Verlust oder Schaden materieller oder immaterieller Art, welche aus dem Zugriff auf, die Nutzung oder Nichtnutzung der veröffentlichten Informationen, durch Missbrauch oder technische Störungen entstehen.

ISSN 1661-9285

ISBN 978-3-302-40109-6



## Vorwort des Herausgebers

Das Schweizer Mittelland ist sowohl Wohn- als auch Arbeitsort für mehr als die Hälfte der nationalen Bevölkerung. Diese Region wird intensiv genutzt. Zum einen besteht eine grosse Nachfrage an Ressourcen wie Steine und Erden, Grundwasser und Erdwärme, zum anderen beziehen auch die Verantwortlichen von privaten und öffentlichen Infrastrukturen (ÖV, Strassen, Geoenergie) diesen Raum vermehrt in die Planung mit ein. Die Erschliessung dieser Geopotenziale und die nachhaltige Bewirtschaftung der endlichen Ressource «Untergrund» hat gesellschaftliche, politische, wirtschaftliche und geowissenschaftliche Relevanz.

Die Landesgeologie ist das Kompetenzzentrum des Bundes für die Dokumentation des Untergrundes. Sie befasst sich mit der Erhebung, Analyse und Bereitstellung von digitalen geologischen Daten und 3D-Modellen von nationalem Interesse. Im Rahmen des EU-Programms «INTERREG IV B Alpine Space» wurde im Projekt «GeoMol – Bewertung von Geopotenzialen für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den alpinen Vorlandbecken» (2012–2015) ein geologisches 3D-Übersichtsmodell des Molassebeckens (GeoMol15) erstellt. Darüber hinaus wurde in einem separaten Projekt ein detailliertes geologisches 3D-Modell (GeoMol17) des Schweizer Mittel-

landes entwickelt. Die Ergebnisse des Projekts bilden die ersten Schritte, den Untergrund der Schweiz systematisch zu beschreiben und zu visualisieren. Das Projekt GeoMol liefert damit einen aktiven Beitrag für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung des Untergrundes.

GeoMol ist vor allem ein bedeutendes Kooperationsprojekt mit Institutionen innerhalb der Schweiz und Europa. Die Landesgeologie hat mit Partnern aus Bund (ARE, BAFU, BFE), Kantonen (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), Universitäten (Basel, Bern, Freiburg und Genf), dem Geologischen Museum des Kantons Waadt und Privaten (Nagra, SEAG) zusammengearbeitet. Gleichzeitig konnte mit GeoMol bei allen Beteiligten neues Wissen und Erfahrung im Bereich der geologischen 3D-Modellierung aufgebaut werden. Die Zusammenarbeit im GeoMol-EU-Projekt konzentrierte sich im Rahmen des EU-Programms «INTERREG IV B Alpine Space» auf Partner aus Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und Slowenien.

Für den Inhalt des Textes, die Illustrationen und die Anhänge sind die Autoren allein verantwortlich.

Olivier Lateltin  
Leiter der Landesgeologie

## Préface de l'éditeur

Le Plateau suisse est un lieu de résidence et de travail pour plus de la moitié de la population suisse. Cet espace est utilisé intensivement. D'une part, elle fait l'objet d'une importante demande en ressources telles que roches et terres, eaux souterraines et géothermie. D'autre part, les responsables d'infrastructures privées et publiques (transports publics, routes, géoénergie) l'intègrent de plus en plus dans leurs planifications. La mise en valeur de son potentiel géologique et l'exploitation durable des ressources limitées de son sous-sol revêtent une grande importance sociétale, politique, économique et géoscientifique.

Le Service géologique national est le centre de compétence de la Confédération pour la documentation du sous-sol. Il est chargé du relevé, de l'analyse et de la mise à disposition de données géologiques numériques et de modèles tridimensionnels d'intérêt national. Dans le cadre du programme européen «INTERREG IV B Alpine Space», le projet «GeoMol – Évaluation du potentiel géologique dans les bassins d'avant-chaîne alpins pour planifier et exploiter durablement leurs ressources naturelles» a permis d'élaborer entre 2012 et 2015 un modèle géologique tridimensionnel synthétique du bassin molassique (GeoMol15). En outre un projet séparé s'est attaché à développer un modèle géologique tridimensionnel détaillé du Plateau suisse (Geo-

Mol17). Les résultats de ces deux projets posent les premiers jalons en vue de décrire et de visualiser systématiquement le sous-sol suisse. Le projet GeoMol fournit ainsi une contribution active à la planification et à l'exploitation durable du sous-sol.

GeoMol constitue surtout un important projet de coopération avec des institutions sises en Suisse et en Europe. Le Service géologique national a collaboré avec des partenaires de la Confédération (ARE, OFEV, OFEN), avec des cantons (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), des universités (Bâle, Berne, Fribourg, Genève), le Musée de géologie du canton de Vaud et des entités privées (Nagra, SEAG). GeoMol a en même temps permis à tous les intervenants d'acquérir de nouvelles connaissances dans le domaine de la modélisation géologique tridimensionnelle. Au sein du projet européen, la Suisse a essentiellement travaillé avec des partenaires allemands, français, italiens, autrichiens et slovènes dans le cadre du programme «INTERREG IV B Alpine Space».

Les auteurs sont seuls responsables du contenu du texte, des illustrations et des annexes.

Olivier Lateltin  
Responsable du Service géologique national

## Prefazione dell'editore

L'Altipiano svizzero è un luogo di residenza e di lavoro per oltre la metà della popolazione svizzera. Questa regione è intensamente sfruttata. Da una parte, essa è soggetta a un'importante domanda di risorse quali rocce e terre, acque sotterranee e geotermia. D'altra parte, i responsabili di infrastrutture private e pubbliche (trasporti pubblici, strade, geo-energia) la integrano sempre più nelle loro pianificazioni. La valorizzazione del suo potenziale geologico e lo sfruttamento sostenibile delle risorse limitate del suo sottosuolo rivestono una grande importanza sociale, politica, economica e geoscientifica.

Il Servizio geologico nazionale è il centro di competenza della Confederazione per la documentazione del sottosuolo. Esso è incaricato del rilievo, dell'analisi e della messa a disposizione di dati geologici numerici e modelli tridimensionali d'interesse nazionale. Sotto l'egida del programma europeo «INTERREG IV B Alpine Space», nell'ambito del progetto «GeoMol-Valutazione del potenziale geologico nei bacini di avampaese alpini per pianificare e sfruttare sostenibilmente le loro risorse naturali», è stato elaborato tra il 2012 e il 2015 un modello geologico tridimensionale sintetico del bacino molassico (GeoMol15). Inoltre un progetto separato si è concentrato sullo sviluppo di un modello geologico tridimensionale dettagliato dell'Altipiano svizzero (GeoMol17).

I risultati di questi due progetti pongono le prime basi in vista della descrizione e della visualizzazione sistematica del sottosuolo svizzero. Il progetto GeoMol fornisce quindi un contributo attivo alla pianificazione e allo sfruttamento sostenibile del sottosuolo.

GeoMol costituisce soprattutto un importante progetto di cooperazione con istituzioni che hanno sede in Svizzera e in Europa. Il Servizio geologico nazionale ha collaborato con partners della Confederazione (ARE, UFAM, UFE), con i cantoni (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), le università (Basilea, Berna, Friburgo, Ginevra), il Museo di geologia del Canton Vaud ed enti privati (Nagra, SEAG). Nel contempo GeoMol ha permesso a tutti i partecipanti di acquisire nuove conoscenze nel campo della modellizzazione geologica tridimensionale. In seno al progetto europeo, la Svizzera ha lavorato essenzialmente con partners tedeschi, francesi, italiani, austriaci e sloveni nell'ambito del programma «INTERREG IV B Alpine Space».

Gli autori sono i soli responsabili del contenuto del testo, delle illustrazioni e degli allegati.

Olivier Lateltin  
Responsabile del Servizio geologico nazionale

## Foreword from the editor

The Swiss Plateau is both a place of work and residence for more than half the nation's population. This region is subject to intensive land use. On the one hand, there is a high demand for resources such as rocks and soils as well as groundwater and geothermal energy. On the other hand, those in charge of private and public infrastructure (public transport, roads, geo-energy) are increasingly involved in planning in the same areas. The development of these geopotentials and the sustainable management of the finite resource «subsurface» has social, political, economic and geoscientific relevance.

swisstopo is the federal competence centre responsible for documenting the subsurface. It deals with the collection, analysis, storage and provision of digital geological data and 3D models of national interest. A 3D geological model of the Swiss Molasse Basin (GeoMol15) was produced as part of the project «GeoMol - Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources» (2012–2015), within the framework of the EU's «INTERREG IV B Alpine Space» program. In addition, a more detailed 3D geological model (GeoMol17) of the same region was generated in a separate sub-project. The

results of this project are the first steps in systematically describing and visualizing Switzerland's subsurface. The GeoMol project thus makes an active contribution to the sustainable planning and management of the subsurface.

GeoMol, in particular, is an important collaboration project between various institutions both within Switzerland and across Europe. On a national level, swisstopo worked together with partners from Swiss federal offices (ARE, FOEN, SFOE), cantons (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), universities (Basel, Bern, Fribourg und Geneva), the Cantonal Museum of Geology (VD) and private organisations (Nagra, SEAG). Internationally, cooperation in the GeoMol-EU project focused on partners from Germany, France, Italy, Austria and Slovenia, all within the framework of the EU program «INTERREG IV B Alpine Space». All of those involved with GeoMol were able to acquire new knowledge and experience in the field of 3D geological modelling.

The authors alone are responsible for the content of the text, the illustrations and the appendices.

Olivier Lateltin  
Head of the Swiss Geological Survey

## Zusammenfassung

Dieser Bericht und die dazugehörigen Modelle GeoMol15 und GeoMol17 sind das Resultat von beinahe fünf Jahren Arbeit. Initialisiert wurde das EU-Projekt «GeoMol – Bewertung von Geopotenzialen für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den alpinen Vorlandbecken» im Rahmen des EU-Programms «INTERREG IV B Alpine Space». Ziel dieses Projekts war die Erstellung von je einem zusammenhängenden 3D-Modell des Nordalpinen Vorlandbeckens als auch des Po-Beckens. Ausserdem wurden innerhalb dieses Projekts anhand von fünf Pilotregionen mit detaillierteren Modellen spezifische Fragestellungen bearbeitet. Diese beinhalteten Studien zu Geothermie- und CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial als auch zur Erdbebengefährdung.

Das Modell GeoMol15 ist eine Weiterentwicklung der Resultate des Seismischen Atlas des Schweizer Molassebeckens (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). Die Ergänzung besteht aus zusätzlich modellierten Horizonten und Störungszonen, welche auf der Störungsinterpretation des SASMB basieren. In der Schweiz wurden für das GeoMol-EU-Modell nebst dem Übersichtsmodell GeoMol15 in drei Pilotregionen detailliertere Modelle mit höherer Datendichte, zusätzlichen Horizonten und detaillierterer Darstellung der bekannten Störungszonen erstellt. Da diese drei Pilotmodelle mehr als die Hälfte des Schweizer Molassebeckens abdeckten, wurde für das Schweizer GeoMol-Projekt beschlossen, ein durchgehendes detailreiches Modell zu erstellen (GeoMol17). Um dieses Modell zu realisieren, wurde das Schweizer Molassebecken in sechs Modelliergebiete aufgeteilt, welche von sechs verschiedenen Projektpartnern bear-

beitet wurden. Im finalen Modell GeoMol17 sind die Grenzregionen zwischen den sechs Teilmodellen harmonisiert.

Alle verwendeten Eingangsdaten beinhalten Unsicherheiten, welche das 3D-Modell beeinflussen. Daher entsprechen weder GeoMol15 noch GeoMol17 einer exakten Darstellung der Geologie des Schweizer Molassebeckens. Die Modelle geben vielmehr einen Überblick über die wichtigsten strukturellen Elemente des geologischen Untergrunds im Schweizer Molassebecken mit den aktuell zur Verfügung stehenden Daten. Dazu gehören die wichtigsten Störungszonen und 12 stratigraphische Horizonte, die durch das ganze Molassebecken in seismischen Daten kartierbar sind.

Es ist durchaus zu erwarten, dass in absehbarer Zukunft das Interesse an der Nutzung des Untergrunds an Bedeutung stärker zunehmen wird. Bei den verschiedenen Nutzungsarten, sei es als Baugrund, zur Gewinnung von Rohstoffen, zur Produktion oder Speicherung von Energie, für die Entsorgung oder bei der Zwischenlagerung von Kohlenwasserstoff, kann es zu Nutzungskonflikten kommen. Daher werden sich Behörden und Gesetzgeber zunehmend mit dem Raumplanungsrecht im Untergrund befassen müssen. Mithilfe der 3D-Modelle aus GeoMol können sie sich ein erstes Bild über den Untergrund machen. Weitere Abnehmer sind Unternehmen aus der Privatwirtschaft, die für die Durchführung von Pilotstudien verschiedenster Ausrichtungen ein 3D-Modell des Untergrunds benötigen. In Ausbildungsstätten dienen solche Modelle zur Visualisierung der geologischen Gegebenheiten oder als Ausgangslage zur weiteren Modellierung in eigenen Forschungsprojekten.

## Résumé

Le présent rapport ainsi que les modèles GeoMol15 et GeoMol17 qui l'accompagnent sont le fruit de près de cinq ans de travail. Le projet «GeoMol – Évaluation du potentiel géologique dans les bassins d'avant-chaîne alpins pour planifier et exploiter durablement leurs ressources naturelles» a été lancé dans le cadre du programme européen «INTERREG IV B Alpine Space». Le but du projet consistait à élaborer un modèle tridimensionnel continu du bassin d'avant-chaîne nord-alpin et un autre de la plaine du Pô. Il visait aussi à traiter certaines questions spécifiques en examinant cinq régions pilotes à l'aide de modèles détaillés. Le potentiel géothermique, le potentiel de stockage de CO<sub>2</sub> et l'aléa sismique en faisaient notamment partie.

Le modèle GeoMol15 s'inscrit dans la suite des résultats de l'Atlas sismique du bassin molassique suisse (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). La nouveauté réside dans la modélisation d'horizons et de zones tectonisées supplémentaires, en se basant sur l'interprétation de failles signalées dans l'Atlas. La contribution suisse au modèle GeoMol européen comprend le modèle d'ensemble GeoMol15, ainsi que des modèles plus détaillés dans trois régions pilotes, élaborés avec une densité supérieure de données, des horizons supplémentaires et des représentations plus fines des zones de failles connues. Ces trois domaines pilotes couvrant plus de la moitié du bassin molassique suisse, il a été décidé de réaliser, pour le projet GeoMol Suisse, un modèle continu incluant de nombreux détails (GeoMol17). À cet effet, le bassin molassique suisse a été subdivisé en six aires de modélisation, qui ont été traitées par les six partenaires du projet.

Les zones de jonction entre ces six sous-modèles ont ensuite été harmonisées pour donner le modèle final GeoMol17.

Toutes les données utilisées sont affectées d'incertitudes qui influencent les modèles 3D. Par conséquent, GeoMol15 et GeoMol17 ne reflètent pas exactement la géologie du bassin molassique suisse, mais donnent plutôt un aperçu des principaux éléments structuraux de son sous-sol géologique en fonction des données actuellement disponibles. Ils comprennent les principales zones faillées et douze horizons stratigraphiques cartographiables dans tout le bassin molassique à partir des données sismiques.

Il faut s'attendre à ce que l'intérêt pour l'utilisation du sous-sol croisse fortement dans un proche avenir. Des conflits pourront ainsi survenir entre les divers types d'usages, tels que sol de fondation, lieu d'extraction de matières premières, de production ou stockage d'énergie, d'élimination ou encore d'entreposage provisoire d'hydrocarbures. Les autorités et les organes législatifs seront donc appelés à se préoccuper toujours davantage de l'extension du droit de l'aménagement du territoire en profondeur. Un premier aperçu du sous-sol géologique leur est fourni par les modèles 3D de GeoMol. Ces modèles serviront aussi aux entreprises privées qui ont besoin de modélisations tridimensionnelles du sous-sol pour réaliser des études pilotes de toutes sortes. Les centres de formation pourront également en tirer profit pour visualiser des caractéristiques géologiques ou pour fonder leurs propres modèles dans le cadre de projets de recherche.

## Riassunto

Il presente rapporto insieme ai modelli GeoMol15 e GeoMol17 che lo accompagnano sono il frutto di quasi cinque anni di lavoro. Il progetto «GeoMol – Valutazione del potenziale geologico nei bacini di avampaese alpini per pianificare e sfruttare sostenibilmente le loro risorse naturali» è stato lanciato nell'ambito del programma europeo «INTERREG IV B Alpine Space». Lo scopo del progetto consisteva nell'elaborare un modello tridimensionale continuo del bacino di avampaese nord-alpino e uno della pianura padana. Esso mirava pure a trattare alcune questioni specifiche esaminando cinque regioni pilota attraverso modelli dettagliati. In particolare ne facevano parte il potenziale geotermico, il potenziale di stoccaggio di CO<sub>2</sub> e la pericolosità sismica.

Il modello GeoMol15 rappresenta il seguito dei risultati raggiunti con l'Atlante sismico del bacino molassico svizzero (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). La novità risiede nella modellizzazione di orizzonti e zone tettoniche supplementari, sulla base dell'interpretazione di faglie segnalate nell'Atlante. Il contributo svizzero al modello GeoMol europeo comprende il modello generale GeoMol15, nonché i modelli più dettagliati di tre regioni pilota, elaborati con una densità di dati superiore, con orizzonti supplementari e rappresentazioni più sottili delle zone di faglia conosciute. Siccome queste tre zone pilota ricoprono oltre la metà del bacino molassico svizzero è stato deciso di realizzare, per il progetto GeoMol Svizzera, un modello continuo che includesse numerosi dettagli (GeoMol17). A questo scopo, il bacino molassico svizzero è stato suddiviso in sei aree di modellizzazione

che sono state trattate dai sei partners del progetto. Le zone di congiunzione tra questi sei sotto-modelli sono state in seguito armonizzate per portare al modello finale GeoMol17.

Tutti i dati utilizzati sono soggetti ad incertezze che influenzano i modelli 3D. Di conseguenza, GeoMol15 e GeoMol17 non riflettono esattamente la geologia del bacino molassico svizzero, ma offrono piuttosto uno scorcio dei principali elementi strutturali del suo sottosuolo geologico in funzione dei dati attualmente disponibili. I modelli comprendono le principali zone di faglia e dodici orizzonti stratigrafici cartografabili in tutto il bacino molassico partendo dai dati sismici.

Ci si aspetta che l'interesse per l'utilizzo del sottosuolo cresca fortemente in un futuro prossimo. Si potranno quindi verificare dei conflitti tra i diversi tipi di utilizzo, quali terreno di fondazione, luogo di estrazione delle materie prime, di produzione o stoccaggio dell'energia, di smaltimento o di deposito provvisorio di idrocarburi. Le autorità e gli organi legislativi saranno pertanto chiamati ad occuparsi sempre maggiormente dell'estensione del diritto per la pianificazione del territorio in profondità. Una prima visione del sottosuolo geologico è fornita loro dai modelli 3D di GeoMol. Questi modelli serviranno pure alle imprese private che hanno bisogno di modellizzazioni tridimensionali del sottosuolo per realizzare studi pilota di ogni genere. I centri di formazione potranno anch'essi trarne dei vantaggi per visualizzare caratteristiche geologiche o per fondare i loro modelli nell'ambito di progetti di ricerca.

## Summary

This report and its associated GeoMol15 and GeoMol17 models are the result of almost five years of work. The EU's «GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources» project was launched under the EU program «INTERREG IV B Alpine Space». The goal of this project was the creation of a coherent 3D model of the North Alpine Foreland Basin as well as the Po Basin. In addition, five pilot regions within this project addressed specific questions using more detailed models. These included studies on geothermal and CO<sub>2</sub> storage potentials, as well as on earthquake hazards.

The GeoMol15 model is a further development of the results of the Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). This further development consists of additionally modelled horizons and fault zones; the latter were based on the SASMB fault interpretations. Along with the GeoMol15 model, more detailed models were produced in three pilot regions for the Swiss portion of the GeoMol-EU model. These have a higher data density, additional horizons and more detailed representations of major fault zones. As these three pilot models covered more than half of the Swiss Molasse Basin, it was decided to create a continuous, detailed model for the Swiss GeoMol project (GeoMol17). In order to produce this model, the Swiss Molasse Basin was divided into six regions, which were modelled by six different project partners. In

the final GeoMol17 model, the border regions between the six sub models are harmonised.

All input data contains uncertainties that affect the 3D model. Therefore, neither the GeoMol15 nor the GeoMol17 model is an exact representation of the geology of the Swiss Molasse Basin. Rather, these models provide a general view of the major structural elements of the geological subsurface in the Swiss Molasse Basin using the currently available data. These elements include 12 stratigraphic horizons that can be mapped across the entire Molasse Basin in the seismic data and the main fault zones.

The interest in the use of the subsurface is expected to increase in the near future. As a result, there are likely to be conflicts of interest between the different types of use i.e. be it for the location of new infrastructure, extraction of raw materials, production or storage of energy, temporary storage of hydrocarbons or waste disposal. Authorities and legislators will therefore have to increasingly deal with spatial planning law that covers the subsurface domain. Here, the 3D models from GeoMol can be used to obtain an initial view of the subsurface. Other customers include private companies, who need a 3D model of the subsurface for various types of pilot studies. In academic institutions, such models serve to provide a means of visualizing the general geological conditions or as a starting point for further modeling in their own research projects.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	16			
1.1	Veranlassung .....	16		4.6.1	Übersicht der verfügbaren Daten .....
1.2	GeoMol Europa .....	16		4.6.2	Datenaufbereitung .....
1.3	GeoMol Schweiz .....	17		4.6.3	Neue Interpretationen .....
1.3.1	Modellgebiet .....	17		4.7	Felsoberflächenkarten und -modelle .....
1.3.2	Zwei Modelle .....	17		4.7.1	Übersicht der verfügbaren Daten .....
1.3.3	Verschiedene Arbeitsstile .....	18		4.7.2	Datenaufbereitung .....
1.3.4	Ausrichtung der Produkte .....	19		4.8	Weitere Oberflächendaten .....
1.4	Allgemeine Qualitätsziele für geologische 3D-Modelle .....	19			
1.5	Verwendete Software .....	19		5.	Methodik und Vorgehen .....
1.6	Aufbau des Berichts .....	20		5.1	Ausgangssituation .....
2.	Geologischer Überblick .....	21		5.2	GeoMol15 .....
2.1	Lage und Bau des Molassebeckens .....	21		5.2.1	Generelle Vorgehensweise .....
2.2	Stratigraphie und Ablagerungsgeschichte im Molassebecken .....	22		5.2.2	Seismische Interpretation .....
2.2.1	Karbon-Perm .....	22		5.2.3	Geschwindigkeitsmodell .....
2.2.2	Trias-Kreide .....	22		5.2.4	Horizontmodellierung .....
2.2.2.1	Trias .....	23		5.2.4.1	Topographie und Felsoberfläche .....
2.2.2.2	Jura .....	23		5.2.4.2	Molassehorizonte .....
2.2.2.3	Kreide .....	26		5.2.4.3	Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum» .....
2.2.3	Paläogen-Neogen .....	26		5.2.5	Störungsmodellierung .....
2.2.4	Quartär .....	27		5.2.5.1	Hauptstörungszonen .....
2.3	Tektonische Einheiten der Molasse .....	27		5.2.5.2	Konzeptionelle Störungszonen .....
2.3.1	Jura-Molasse .....	27		5.3	GeoMol17 .....
2.3.2	Mittelländische Molasse .....	27		5.3.1	Generelle Vorgehensweise .....
2.3.3	Subalpine Molasse .....	28		5.3.2	Seismische Interpretation .....
2.4	Tektonische Entwicklung des Molassebeckens .....	28		5.3.3	Mistie-Reduktion .....
2.4.1	Bildung von Permokarbontrögen .....	28		5.3.4	Geschwindigkeitsmodell und Tiefenumwandlung .....
2.4.2	Entwicklung des nordalpinen Vorlandbeckens .....	28		5.3.4.1	Isopachenkarten .....
2.4.3	Einfluss des Oberrheingrabens .....	29		5.3.5	Horizontmodellierung .....
2.4.4	Fernschub und Bildung des Juras .....	29		5.3.5.1	Felsoberfläche .....
2.4.5	Bildung der Triangelzone .....	29		5.3.5.2	Molassehorizonte .....
2.4.6	Neotektonik .....	29		5.3.5.3	Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum» .....
3.	Modellaufbau .....	30		5.3.5.4	Horizont Basis «Permokarbontrög» .....
3.1	Karbon-Perm .....	30		5.3.6	Störungsmodellierung .....
3.2	Trias-Kreide .....	30		5.3.6.1	Störungsmodellierung im Vergleich .....
3.3	Paläogen-Neogen .....	34		5.3.6.2	Störungsmodellierung im tiefen Modell der Landesgeologie .....
4.	Datengrundlage .....	35		5.3.7	Grenzabgleich der Teilmodelle .....
4.1	Datenübersichtskarten .....	35		6.	Resultate und Diskussion .....
4.2	Geologische und tektonische Karten .....	35		6.1	GeoMol15 .....
4.2.1	Übersicht über die verfügbaren Daten .....	35		6.1.1	Störungen .....
4.2.2	Datenaufbereitung .....	35		6.1.2	Horizonte .....
4.3	Geologische Profile .....	37		6.1.2.1	Felsoberfläche .....
4.3.1	Übersicht der verfügbaren Daten .....	37		6.1.2.2	Molassehorizonte .....
4.3.2	Datenaufbereitung .....	38		6.1.2.3	Mesozoische Horizonte .....
4.4	Bohrdaten .....	38		6.2	GeoMol17 .....
4.4.1	Übersicht der verfügbaren Daten .....	38		6.2.1	Störungen .....
4.4.2	Datenaufbereitung .....	38		6.2.1.1	Genereller Überblick .....
4.5	Seismische Sektionen .....	39		6.2.1.2	Störungszonen im Schweizer Molassebecken .....
4.5.1	Übersicht der verfügbaren Daten .....	39		6.2.1.3	Born-Engelberg-Störungszone .....
4.5.2	Datenaufbereitung .....	39		6.2.1.4	St.-Gallen-Störungszone .....
4.5.3	Bodenseekampagne .....	40			
4.6	Seismische Interpretationen .....	40			

6.2.1.5	Störungszonen in der Region des Nordschweizer Permokarbondtrogs	84	9.	Zugang zu den Ergebnissen	114
6.2.2	Horizonte	87	9.1	3D-Datenviewer	114
6.2.2.1	Felsoberfläche	87	9.1.1	3D-Ansicht des 3D-Datenviewers	114
6.2.2.2	Molassehorizonte	87	9.1.2	2D-Ansicht des 3D-Viewers	116
6.2.2.3	Mesozoische Horizonte	89	9.1.2.1	Virtuelle Bohrungen	116
6.2.3	Grenzabgleich der Teilmodelle	95	9.1.2.2	Profile	116
6.2.4	Geschwindigkeitsmodell	97	9.1.2.3	Tiefenkarten	116
7.	Qualitätssicherung und Unsicherheit	98	9.2	map.geologieportal.ch	116
7.1	Qualitätssicherung	98	9.3	Geologie-Portal	116
7.1.1	Qualität der Durchführung	99	9.4	Web Map Service	116
7.1.2	Qualität der Grundlagedaten	99	9.5	Webseite des GeoMol-EU-Projekts	118
7.1.2.1	Generelle Vorgehensweise	99	9.6	Beilagen zum Textband	118
7.1.2.2	Bohrdaten	100	9.6.1	Tafeln	118
7.1.2.3	Seismische Daten	100	9.6.2	Datenträger	118
7.1.2.4	Geologische Profile	100	10.	Ausblick	119
7.1.3	Qualitätssicherung der Teilmodelle	100	11.	Schlusswort	120
7.1.4	Felsoberfläche	100	12.	Danksagung	121
7.1.5	Überprüfung der Qualitätssicherung	100	Literaturverzeichnis	122	
7.2	Unsicherheit geologischer 3D-Modelle	101			
7.2.1	Unsicherheit der Grundlagedaten	101			
7.2.1.1	Primäre geologische Daten	101			
7.2.1.2	Prozessierte primäre geologische Daten	101			
7.2.1.3	Sekundäre geologische Daten und Information	102			
7.2.2	Unsicherheiten der Resultate	102			
8.	Anwendungen	104			
8.1	Anwendung in der Kommunikation und Visualisierung	104			
8.2	Anwendung in der Projektplanung	104			
8.3	Anwendung zur Beurteilung von Nutzungskonflikten	105			
8.4	Anwendung «Charakterisierung von Geopotenzialen»	106			
8.4.1	Tiefengeothermie	106			
8.4.1.1	Nutzungsmöglichkeiten	106			
8.4.1.2	Anwendung GeoMol in der Pilotregion Genf-Savoyen	106			
8.4.1.3	Anwendung GeoMol in der Pilotregion Bodensee-Allgäu	107			
8.4.2	CO <sub>2</sub> -Speicherung	107			
8.4.2.1	Grundlagenstudie für das Schweizer Mittelland	107			
8.4.2.2	Anwendung GeoMol	108			
8.4.3	Tiefengrundwasser	108			
8.4.3.1	Anwendung GeoMol	109			
8.4.4	Geologische Risiken	109			
8.4.4.1	Übersicht über das Schweizer Molassebecken	109			
8.4.4.2	Anwendung GeoMol	112			
8.4.5	Kohlenwasserstoffe	112			
8.4.6	Lagerung von radioaktiven Abfällen	112			
8.4.7	Infrastrukturbauten	112			

## Verzeichnis der Textfiguren und Tabellen

### Textfiguren

Fig. 1-1: Übersicht über das Modellgebiet des GeoMol-EU-Projekts und die Pilotregionen zur Charakterisierung verschiedener Geopotenziale .....	17	Fig. 6-2: Übersicht der modellierten Störungszonen in GeoMol15 .....	71
Fig. 1-2: Das Projektgebiet von GeoMol Schweiz, aufgeteilt nach den Modelliergebieten der einzelnen Partner für GeoMol17 .....	18	Fig. 6-3: Schematische Darstellung der Triangelzone und der konzeptionell modellierten Störungszonen .....	72
Fig. 2-1: Tektonische Übersichtskarte des Schweizer Molassebeckens und angrenzende tektonische Einheiten .....	21	Fig. 6-4: Mächtigkeitskarte der känozoischen Sedimente von GeoMol15 .....	73
Fig. 2-2: Chrono- und lithostratigraphisches Profil des Schweizer Molassebeckens mit Angabe zu den im Projekt GeoMol modellierten Horizonten .....	22	Fig. 6-5: Mächtigkeitskarte der mesozoischen Sedimente von GeoMol15 .....	73
Fig. 2-3: Bohrloch-Korrelation von sieben Tiefbohrungen im Molassebecken .....	24	Fig. 6-6: Einblick in GeoMol17 .....	75
Fig. 2-4: Übersichtskarte über die aufgeschlossenen Molasse-Einheiten und die Faltenachsen im Molassebecken .....	25	Fig. 6-7: Rosendiagramme der modellierten Abschiebungen, Aufschiebungen und Blattverschiebungen auf Höhe Basis «Känozoikum» und Basis «Mesozoikum» .....	77
Fig. 2-5: Querprofil durch den Jura, das Molassebecken (Modellgebiet) und den Alpennordrand .....	26	Fig. 6-8: Übersichtskarte der in GeoMol17 modellierten Störungen auf Höhe Basis «Känozoikum» .....	79
Fig. 4-1: Datenübersichtskarte des Top-Dogger-Horizonts, mit Angabe der vorhandenen Daten- und Interpretationsgrundlagen .....	36	Fig. 6-9: Übersichtskarte der in GeoMol17 modellierten Störungen auf Höhe Basis «Mesozoikum» .....	80
Fig. 4-2: Übersicht der für GeoMol Schweiz zur Verfügung gestellten seismischen 2D-Sektionen .....	39	Fig. 6-10: Modelleinblick im Gebiet der Born-Engelberg-Störungszone anhand von Modellblöcken und Profilsuren .....	81
Fig. 4-3: Bestehende Felsoberflächenmodelle und Felsisohypsenkarten der Schweiz .....	43	Fig. 6-11: 3D-Profilansicht mit unterschiedlichen Interpretationen .....	82
Fig. 5-1: Schematischer Arbeitsablauf zur Erstellung von GeoMol15 .....	47	Fig. 6-12: Einblick in das 3D-Modell GeoMol17 im Umfeld der St.-Gallen-Störungszone .....	84
Fig. 5-2: Intervallgeschwindigkeitskarte (GeoMol15) des seismischen Intervalls Dogger mit Lokalisierung der Tiefbohrungen und Stützpunkte .....	48	Fig. 6-13: Einblick in das 3D-Teilmodell des Nordschweizer Permokarbons .....	85
Fig. 5-3: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs zur Erstellung von (GeoMol17) .....	54	Fig. 6-14: Konzeptionelle Störungsentwicklung der «Fischschwanz»-Struktur der Stadel-Irchel-Antiklinale im Einflussbereich des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments .....	86
Fig. 5-4: Intervallgeschwindigkeitskarte (GeoMol17) des seismischen Intervalls Dogger mit Lokalisierung der Tiefbohrungen und Stützpunkte .....	56	Fig. 6-15: Höhenmodell der Felsoberfläche .....	88
Fig. 5-5: Tiefenumwandlung .....	57	Fig. 6-16: Mächtigkeitskarte der quartären Lockergesteine; ein abgeleitetes Produkt der modellierten Felsoberfläche .....	88
Fig. 5-6: Unkorrigierte Mächtigkeitsverteilung des Lias-Intervalls im Teilmodell Landesgeologie .....	57	Fig. 6-17: Höhenmodell der Felsoberfläche mit der Zuteilung der Molasse-Einheiten .....	89
Fig. 5-7: TUSM-Horizontmodellierung .....	59	Fig. 6-18: Höhenmodell Top Dogger aus GeoMol17 mit den Störungszonen, welche den Horizont schneiden .....	91
Fig. 5-8: Schematische Darstellung des Versatz-Länge-Verhältnisses .....	64	Fig. 6-19: Mächtigkeitskarte Dogger aus GeoMol17 .....	94
Fig. 5-9: Karten- und Profilansicht von Störungspolygonen einer Auf- und einer Abschiebung .....	65	Fig. 6-20: Grenzabgleich der Teilmodelle .....	96
Fig. 5-10: Arbeitsschritte zur Bestimmung der Tiefenwerte für Störungspolygone einer Ab- und einer Aufschiebung .....	65	Fig. 7-1: Workflow «Qualitätssicherung Datenübernahme» für die Erstellung von geologischen 3D-Modellen .....	99
Fig. 5-11: Grenzabgleich einer Störungszone .....	66	Fig. 7-2: X-Z-Diagramm der Überschiebung «Kronberg-Süd» mit Knotenpunktverteilungen mit unterschiedlichen Abständen .....	103
Fig. 5-12: Illustration der gegenseitigen Anpassung von Horizonten anhand von regelmässigen Profilen .....	66	Fig. 8-1: Schematische Planung eines hypothetischen Geothermieprojekts .....	105
Fig. 6-1: Einblick in GeoMol15 .....	69	Fig. 8-2: Gemeinsamkeiten zwischen GeoMol und dem Programm «Geothermie 2020» .....	107
		Fig. 8-3: Geologisches 3D-Modell der Region Freiburg-Bern-Solothurn-Luzern .....	108
		Fig. 8-4: Darstellung der Erdbebenzentren (Magnitude >2) im Deckgebirge vor dem Hintergrund des Störungsmodells von GeoMol17 auf der Höhe Basis «Känozoikum» .....	110

Fig. 8-5: Darstellung der Erdbebenzentren (Magnitude >2) im Grundgebirge (bis -15 km) vor dem Hintergrund des Störungsmodells von GeoMol17 auf der Höhe Basis «Mesozoikum» .....	111
Fig. 9-1: Der Aufbau des 3D-Datenviewers .....	115
Fig. 9-2: Ansicht des Reiters «2D-Geologie» .....	115
Fig. 9-3: map.geologieportal.ch als zentraler Einstieg zur 2D-Visualisierung von geologischen Daten der Schweiz .....	117
Fig. 9-4: WMS-Layer «CO <sub>2</sub> -Speicherpotenzial für den Hauptrogenstein und den Effingen-Member in der Pilotregion Schweizer Mittelland» .....	117

## Tabellen

Tab. 3-1: Übersicht über die modellierten Horizonte von GeoMol15 und der Pilotmodelle sowie der Vergleich der Bezeichnungen CH-EU .....	31
Tab. 3-2: Übersicht über die modellierten Horizonte und deren Grundlagedaten der einzelnen Teilmodelle aus GeoMol17 .....	32
Tab. 4-1: Kartendatengrundlage für die Modellierung von GeoMol17 .....	37
Tab. 4-2: Interpretierte Horizonte in den seismischen Daten und Bezeichnung der seismischen Markerhorizonte im Projekt GeoMol im Vergleich zu vorhergehenden Arbeiten im Schweizer Molassebecken .....	41
Tab. 4-3: Bestehende Felsoberflächenmodelle in der Schweiz, welche für die Modellierung der Felsoberfläche von GeoMol17 verwendet wurden .....	44
Tab. 5-1: Überblick über die Vorgehensweise zur Modellierung von Horizonten in den verschiedenen Teilmodellen .....	51
Tab. 5-2: Überblick über die Vorgehensweise zur Modellierung von Störungen in den verschiedenen Teilmodellen .....	62
Tab. 7-1: Die vier Aspekte der Qualitätssicherung für geologische 3D-Modellierung mit Beschreibung der jeweiligen Grundsätze .....	99
Tab. 9-1: Übersicht über die auf dem beiliegenden Datenträger verfügbaren Kartendaten .....	118

# 1. Einleitung

Geodaten sind eine wichtige Grundlage für politische, wirtschaftliche und private Entscheidungen. 60–80% aller verfügbaren Daten haben einen Raumbezug (WILLIAMS & VAN DEMARK 1987, COOPERS AND LYBRAND 1996, HAHMANN & BURGHARDT 2013). Die für die Entscheidungsfindung verwendeten räumlichen Informationen liegen meistens als 2D-Oberflächendaten vor, dreidimensionale Beschreibungen und Visualisierungen des Untergrundes hingegen, sind nur in geringer Anzahl vorhanden und spielen bei der Entscheidungsfindung nur eine untergeordnete Rolle. Gleichzeitig wird eine verstärkte Nutzung des Untergrundes als Lösung für viele zukünftige Herausforderungen (Versorgungssicherheit, Bevölkerungsschutz und Mobilität) angesehen. Daraus entstehende Nutzungskonflikte in Verbindung mit gegensätzlichen Ansprüchen oder Auffassungen (z.B. 3D-Eigentum vs. 3D-Raumplanung) werden möglicherweise Grund für zukünftige Dispute sein (BAUMBERGER & ALLENBACH 2016).

Die Landesgeologie hat diesen Umstand früh erkannt und 2011 als Ergänzung zur klassischen geologischen Kartierung die geologische 3D-Modellierung als neuen Arbeitsbereich eingeführt. Mit den geologischen 3D-Modellen des Schweizer Mittellandes liegt jetzt zum ersten Mal eine einfach zugängliche und harmonisierte dreidimensionale Grundlage vor. Sie kann in verschiedenen Detaillierungsgraden für eine erste Abschätzung möglicher Nutzungskonflikte und -potenziale eingesetzt werden.

## 1.1 Veranlassung

Das Schweizer Mittelland ist sowohl Wohn- als auch Arbeitsort von mehr als der Hälfte der Schweizer Bevölkerung. Bedingt durch ihre geologische Geschichte und ihre zentrale Lage unterliegt diese Region bereits heute einer intensiven Nutzung der natürlichen Ressourcen (z.B. mineralische Rohstoffe, Grundwasser, untiefe Erdwärme) sowie durch Infrastrukturbauten (öffentlicher Verkehr, Strassen, Energie usw.). Zukünftig wird der Nutzungsdruck auf dieses Gebiet durch Politik, Technologie und Bevölkerungswachstum weiter steigen und die unterirdischen Potenziale des Mittellandes (z.B. Geothermie, Lagerung von Abfällen, Kohlenwasserstoffe) in den Mittelpunkt des Interesses rücken. Die heute vorhandenen Instrumente genügen den zukünftigen Anforderungen nicht oder nur teilweise. Die heutige Raumplanung vernachlässigt den Untergrund, die föderalistische Struktur der Schweiz erschwert den Zugang zu entsprechenden Grundlagedaten (KETTIGER 2016) und entsprechende 3D-Datensätze des Untergrundes sind aus unterschiedlichen Gründen nicht öffentlich verfügbar.

Einerseits verlangt die Ressourcenknappheit nach langfristigem und nachhaltigem Management von Erkundung, Abbau, Nutzung und gegebenenfalls Rückführung. Andererseits wird das Mittelland als Förderregion in der zukünftigen Energieversorgung des Landes eine noch wichtigere Rolle spielen, und zusätzlich werden zahlreiche Infrastrukturprojekte (Energie, Transport) ebenfalls im Mittelland geplant und realisiert.

Die Erfassung der unterschiedlichen Geopotenziale (LANDESGEOLOGIE in Vorb.) und die darauf aufbauende, bewusste und nachhaltige Bewirtschaftung der endlichen Ressource «Untergrund» hat demnach grosse gesellschaftliche und geowissenschaftliche Relevanz.

Mit der Erstellung der geologischen 3D-Modelle des Schweizer Mittellandes sollten neben der Beantwortung erdwissenschaftlicher Fragestellungen auch Grundlagen für die Bearbeitung anderer Themen zur Verfügung gestellt werden:

- Steigerung der politischen und öffentlichen Wahrnehmung des Untergrundes als endliche Ressource.
- Stärkung der volkswirtschaftlichen Ausrichtung geologischer Basisdaten für eine nachhaltige Nutzung des Untergrundes in der Schweiz.
- Förderung der nationalen Zusammenarbeit hinsichtlich Raumplanung, Ressourcenförderung und Harmonisierung von Grundlagedaten.

Die vorliegenden geologischen 3D-Modelle des Schweizer Molassebeckens (Mittelland) wurden teilweise im Rahmen des europäischen Projekts «GeoMol – Bewertung von Geopotenzialen für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den alpinen Vorlandbecken» (GEOMOL TEAM 2015) erarbeitet. Die Durchführung dieses Projekts war getrieben von der Motivation, grenzüberschreitende geologische Grundlagen für die 3D-Raumplanung zu erarbeiten und diese Grundlagen für Projektplaner, Ingenieure und Entscheidungsträger zur Verfügung zu stellen.

## 1.2 GeoMol Europa

GeoMol war ein von der EU gefördertes Projekt und wurde von der Europäischen Territorialen Kooperation im Rahmen des «INTERREG IV B Alpine Space Programme» unterstützt. In der Projektorganisation waren 14 Partner aus 6 verschiedenen Ländern vertreten, das Projekt dauerte von September 2012 bis Juni 2015. Ziel war es, einerseits ein transnationales und harmonisiertes geologisches 3D-Modell des Nordalpinen Vorlandbeckens und Teilen des Po-Beckens

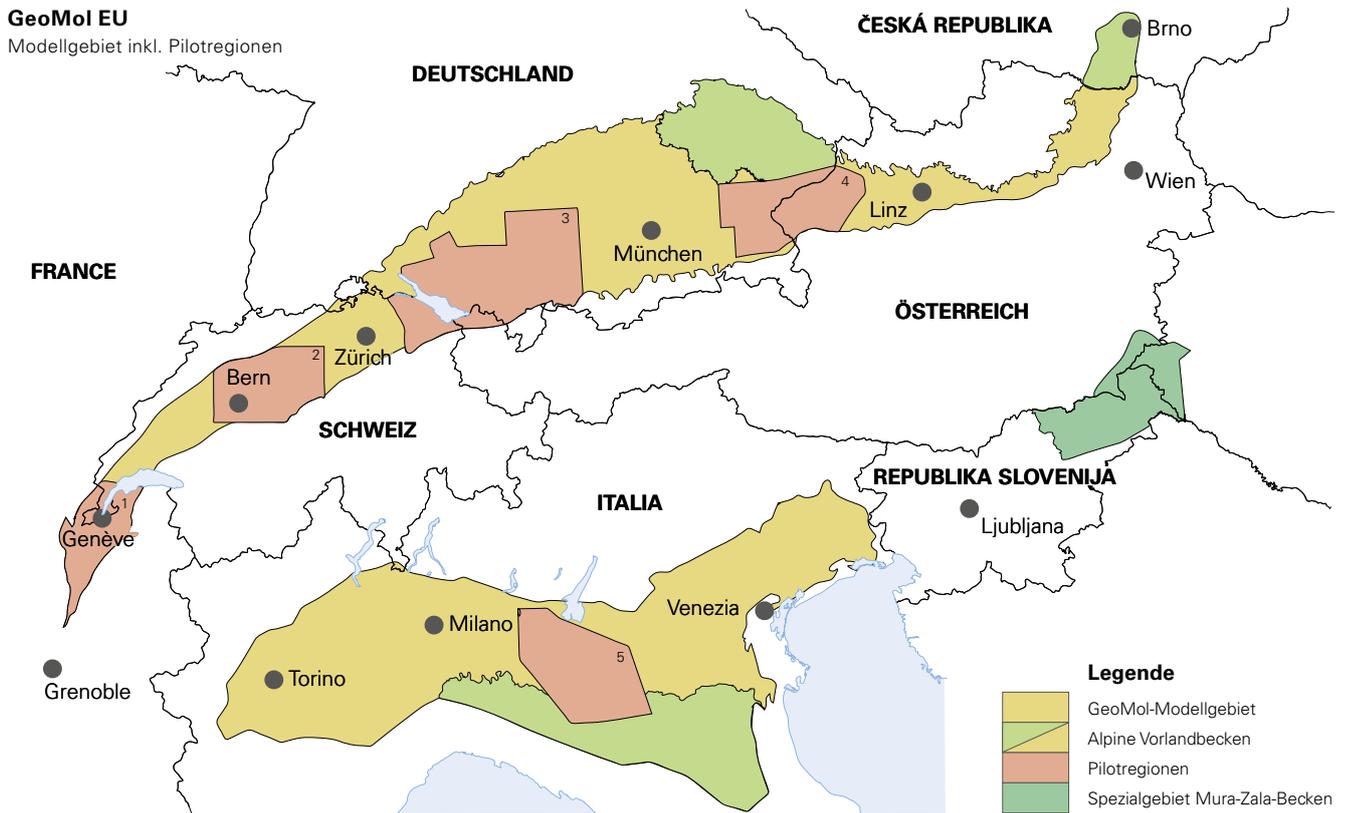


Fig. 1-1: Übersicht über das Modellgebiet des GeoMol-EU-Projekts und die Pilotregionen zur Charakterisierung verschiedener Geopotenziale. (1) Genf-Savoyen, (2) Schweizer Mittelland, (3) Bodensee-Allgäu, (4) Oberösterreich-Oberbayern, (5) Brescia-Mantua-Mirandola. GEOMOL TEAM (2015), überarbeitet.

zu erstellen. Andererseits sollten in ausgewählten Pilotregionen die dort vorhandenen oder vermuteten Geopotenziale (Erdwärme, Thermalwasser, Lagerung von Abfällen) und Gefahrenpotenziale (z.B. Erdbebengefährdung) beschrieben und bewertet werden (Fig. 1-1).

Neben einem Übersichtsmodell mit geringem Detaillierungsgrad über das gesamte Projektgebiet wurden in 5 Pilotregionen (Genf-Savoyen, CAPAR et al. 2015; Schweizer Mittelland; Bodensee-Allgäu, GEOMOL LCA-PROJEKTTEAM 2015; Oberösterreich-Oberbayern, PFLEIDERER et al. 2016; Brescia-Mantua-Mirandola, ISPRA 2015) und einer Spezialstudie (ŠRAM et al. 2015) jeweils thematische Modelle zu den erwähnten Potenzialen mit einem grösseren Detaillierungsgrad erstellt. Die Resultate sind sowohl in Berichtsform als auch als nutzbare 3D-Modelle und als 2D-Kartendienst erschienen. Die vorhandenen Ergebnisse können unter der Internetadresse <http://www.geomol.eu> abgerufen und teilweise heruntergeladen werden.

### 1.3 GeoMol Schweiz

#### 1.3.1 Modellgebiet

Die nördliche Begrenzung des Modellgebiets GeoMol Schweiz (Fig. 1-2) ist grösstenteils durch die Ausbisslinie des Horizonts Basis «Känozoikums» definiert. Diese entspricht über weite Teile des Modellgebiets der Südgrenze des Jura-

gebirges. Im Modell wurde teilweise aber auch die erste Antiklinale dieses Vorlandüberschiebungsgürtels in die Arbeiten miteinbezogen. Im Süden des Molassebeckens wird das Modelliergebiet durch die nördliche Grenze der alpinen Decken begrenzt.

#### 1.3.2 Zwei Modelle

Im Schweizer Mittelland wurden zwei Modelle erstellt, welche das gesamte Molassebecken abdecken, sich aber hinsichtlich der Datengrundlage und Detaillierungsgrad bezüglich Stratigraphie und Störungselementen unterscheiden (BAUMBERGER & ALLENBACH 2016).

- GeoMol15: Das Modell dient der Übersicht über die Geologie des Schweizer Molassebeckens und hat eine Maschenweite von 200 m. Es entspricht demjenigen Modell, welches im Rahmen von GeoMol Europa (Fig. 1-1) erstellt wurde.
- GeoMol17: Dieses Modell konnte aufgrund einer grösseren Anzahl von Eingangsdaten in höherem Detaillierungsgrad bearbeitet werden. Die Maschenweite beträgt 100 m. So wurden zum Beispiel die Störungszonen detaillierter als in GeoMol15 bearbeitet.

GeoMol15 basiert hauptsächlich auf dem Seismischen Atlas des Schweizer Molassebeckens (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012), ergänzt diese Grundlage aber in drei wesentlichen Punkten:

## GeoMol Schweiz

Übersicht der Modelliergebiete

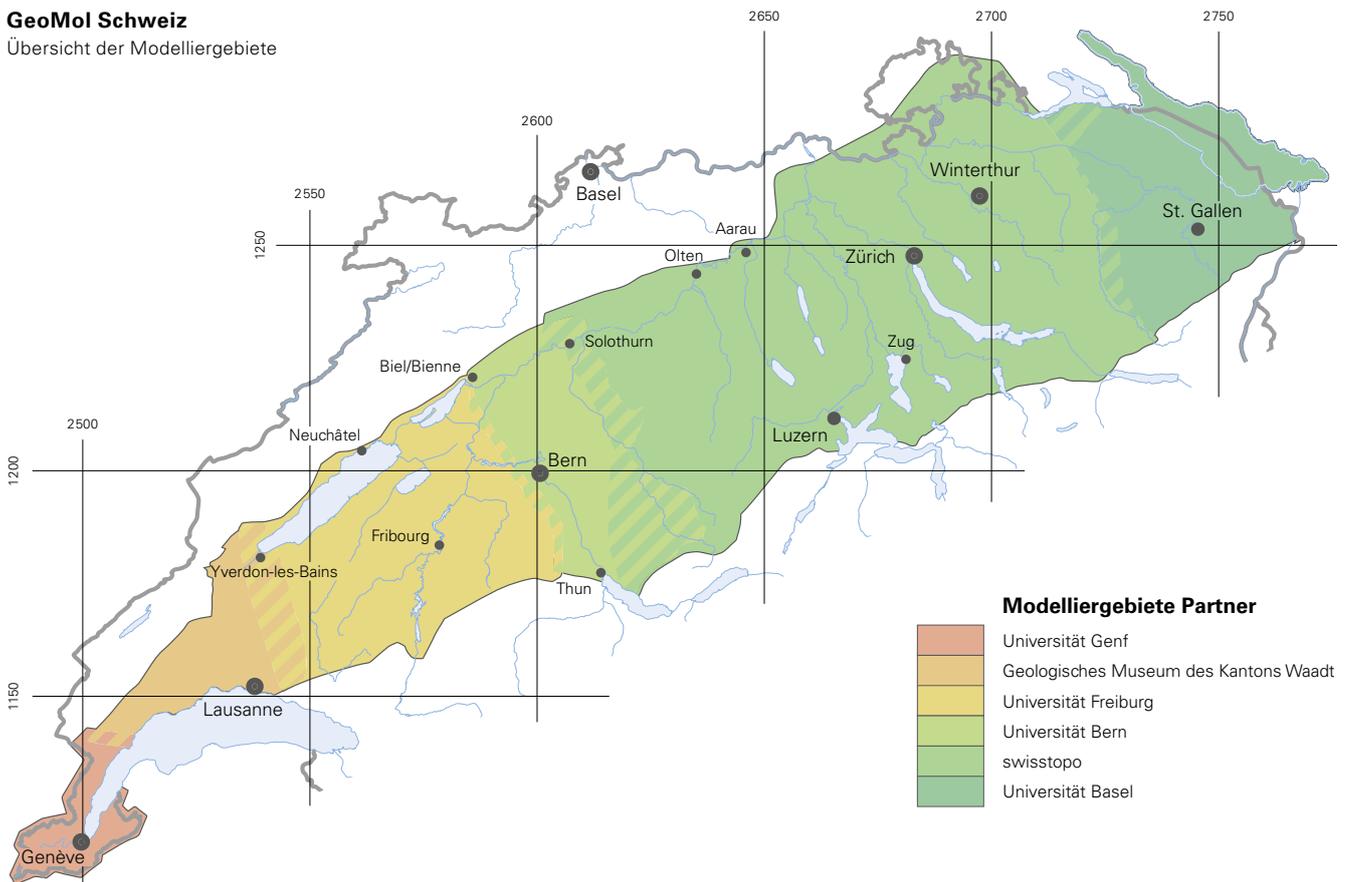


Fig. 1-2: Das Projektgebiet von GeoMol Schweiz, aufgeteilt nach den Modelliergebieten der einzelnen Partner für GeoMol17.

- Zusätzliche Bohrdaten aus der Schweiz wurden integriert, um zusätzliche Stützpunkte für die modellierten stratigraphischen Horizonte (Kap. 3) zu erhalten.
- Basierend auf den interpretierten Störungen wurden vereinfachte Störungszonen modelliert.
- Mit der Felsoberfläche und zwei internen Molassehorizonten wurden zwei lithostratigraphische Horizonte mit grosser Bedeutung sowohl in wissenschaftlicher Hinsicht als auch im Hinblick auf die Nutzung des Untergrundes ergänzt.

GeoMol17 basiert auf teilweise anderen sowie zusätzlichen Grundlagedaten als GeoMol15 und kann deshalb nicht direkt mit Letzterem verglichen werden. Die Unterschiede von GeoMol17 zu GeoMol15 sind die folgenden:

- Bei bereits vorhandenen und nur teilweise interpretierten seismischen Sektionen wurde die Interpretation vervollständigt.
- In GeoMol15 noch nicht genutzte seismische Sektionen wurden digitalisiert und interpretiert.
- Zusätzliche Tiefbohrungen aus Deutschland wurden in ein neues Geschwindigkeitsmodell integriert, um die Zeit-Tiefen-Konversion der Interpretation der seismischen Daten besser abzustützen.

- Zusätzlich zu den Tiefbohrungen (>500 m) wurden auch Bohrungen mit mittlerer Tiefe (100–500 m) verwendet.
- Eine grössere Anzahl an Oberflächendaten wie geologische Karten, Profile und Strukturmessungen wurde genutzt.

Die Modellierung wurde durch swisstopo in Zusammenarbeit mit den fünf Partnern Universität Genf (CLERC 2016), Geologisches Museum des Kantons Waadt (MARCHANT & BAUER 2016), Universität Freiburg (GRUBER et al. 2016), Universität Bern (MOCK 2016) und Universität Basel (HUGGENBERGER et al. 2016) realisiert (Fig. 1-2).

Im nachfolgenden Kapitel über die Methodik (Kap. 5) wird vor allem auf das Vorgehen bei swisstopo eingegangen. Aufgrund der Anbindung der Horizonte an die Ausbisslinien und der Datengrundlage hat swisstopo ihr Modelliergebiet für die Bearbeitung weiter aufgeteilt in ein tiefes und zwei untiefe Teilmodelle (Kap. 5.3).

### 1.3.3 Verschiedene Arbeitsstile

Sechs verschiedene Partner haben am GeoMol17 mitgearbeitet (Fig. 1-2). Die zu modellierenden lithostratigraphischen Horizonte und Bestimmungen zu den abzugebenden Resultaten waren vorgegeben. Aufgrund der in den jeweili-

gen Modelliergebieten verfügbaren Grundlagedaten, dem Vorwissen der beteiligten Personen und der vorhandenen IT-Infrastruktur wurde mit den Partnern eine freie Wahl der Methoden, der Vorgehensweise und der Interpretations- und Modelliersoftware vereinbart.

Dies führte dazu, dass in der aktuellen Version von GeoMol17 verschiedene Arbeitsstile erkennbar sind. Ein Beispiel ist die unterschiedliche Darstellung von Versätzen an Störungszonen, welche teilweise als einfache Stufen (mit «nicht-aufgeschnittenen» Oberflächen) oder aber mit Trennung des Hangenden vom Liegenden (mit «aufgeschnittenen» Oberflächen) bearbeitet wurden (s. a. Kap. 6). Diese Tatsache lässt keine Aussage über die Richtigkeit oder Qualität der geologischen 3D-Modellierung zu, sondern zeigt auf, dass verschiedene Modellierungsansätze zielführend sind. Durch diese Art der Zusammenarbeit hat sich die Wissensbasis für Arbeitsabläufe und technische Möglichkeiten stark weiterentwickelt. Die Verwendung von unterschiedlichen Grundlagedaten führte dazu, dass durch diese Arbeitsgebietsaufteilung die einzelnen Teilmodelle an den Modellgrenzen nicht a priori harmonisiert vorlagen und die Grenzabgleiche zwischen den Teilmodellen folglich nachträglich vorgenommen werden mussten.

#### 1.3.4 Ausrichtung der Produkte

Rund 50 Fachleute aus Wirtschaft und Verwaltung in der Schweiz haben an der Nutzerumfrage für das GeoMol-EU-Projekt (BAUMBERGER & MICHAEL 2013) teilgenommen. Diese Resultate dienen für GeoMol Schweiz als Grundlage für die Ausgestaltung der Projektresultate. Die wichtigsten Ergebnisse der Umfrage sind:

- Die Hauptinteressen bezüglich des tiefen Untergrundes liegen bei den Geopotenzialen (v. a. Geothermie und Rohstoffe) und Nutzungskonflikten (im Sinne der Raumplanung im Untergrund).
- Es werden digitale Produkte beziehungsweise Resultate in Form von Vektordaten, Profilen, virtuellen Schnitten (Bohrungen, Profile) und 3D-Modellen gewünscht, inklusive Angaben oder Karten zur Datenverfügbarkeit und Gesteinsparameter-Sammlungen.
- Analoge Produkte sind in Bezug auf GeoMol nicht gefragt.
- Wichtige Datensätze, welche erwartet werden: wichtige lithostratigraphische Horizonte, Störungen, Konturen des Grundwasserspiegels und Temperaturverteilung im Untergrund.

Einige der oben erwähnten Erwartungen konnten erfüllt werden; die Resultate von GeoMol Schweiz werden ausführlich in Kapitel 6 besprochen. Zusätzlich wurden Ergebnisse erzielt, welche zu Beginn der Arbeiten nicht geplant waren, so z.B. die Datenübersichtskarten und ein neues, aktualisiertes Geschwindigkeitsmodell für das Schweizer Molassebecken.

## 1.4 Allgemeine Qualitätsziele für geologische 3D-Modelle

Ein geologisches 3D-Modell stellt ein vereinfachtes Abbild der geologischen Wirklichkeit und somit in jedem Fall nur eine Annäherung an die Realität dar. Geodaten sind in der Schweiz sehr heterogen verteilt. Einzelne Gegenden weisen eine hohe Dichte an Daten auf und andere haben sehr wenige oder sogar keine Geodaten, je nachdem ob die Gegend bereits im Fokus einer Explorationskampagne im Untergrund stand. Allgemein nimmt die Informationsdichte mit zunehmender Tiefe ab. Gesicherte Informationen aus dem Untergrund sind nur aus (Tief-)Bohrungen erhältlich, grossflächigen Einblick in den Untergrund können einzig seismische Daten bieten. Somit stützen sich geologische 3D-Modelle, gemessen an ihrer Ausdehnung, generell auf relativ wenige, diskret verteilte Grundlagedaten ab.

Durch die geologische 3D-Modellierung kann auch in Gebieten mit geringer Datendichte eine Prognose über den geologischen Aufbau des Untergrundes erstellt werden. Das Modell erfüllt allgemeine Qualitätsziele, wenn es

- topologisch korrekt (keine sich durchdringenden/durchschneidenden geometrischen Objekte) und «wasserdicht» (keine Lücken zwischen geometrischen Objekten) ist,
- so ausgestaltet ist, dass es im Bereich der gesicherten Informationen diese möglichst genau repräsentiert (unter Berücksichtigung der Interpretation der Fachpersonen) und
- im Bereich der nicht vorhandenen Informationen eine geologisch plausible und sinnvolle Interpretation anbietet (unter Berücksichtigung der Datenlage und der Interpretation der Fachpersonen).

In Kapitel 7 wird dieses Thema in Kombination mit der Frage der Unsicherheit von geologischen Modellen nochmals vertieft aufgegriffen.

## 1.5 Verwendete Software

Für die verschiedenen Arbeitsschritte wurden von swisstopo unterschiedliche Softwarepakete verwendet. Ein detaillierter Überblick über die Softwareanwendung bezüglich Arbeitsschritten und Modellgebieten findet sich in Kapitel 5. Es wurden folgende Softwarepakete verwendet:

- GeoGraphix (seismische Interpretation, Bohrdatenbank und Bohrlochkorrelation)
- IHS Kingdom® (Zeit-Tiefen-Konversion)
- Surfer (Rasterung)
- Petrosys (Rasterung und Qualitätskontrolle der seismischen Interpretation)
- ArcGIS (Kartographie und Rasterung)
- Move™ (geologische 3D-Modellierung und Herstellung 3D-pdf)
- GST (Speicherung 3D-Modelle)
- Internetbrowser (Visualisierung 3D-Modelle)
- Adobe Creative Suite (Bericht)

## **1.6 Aufbau des Berichts**

Dieser Bericht ist kein geologischer Schlussbericht, sondern ein Tätigkeitsbericht zum Projekt GeoMol. Er fokussiert auf die Methodik und das Vorgehen der Landesgeologie, präsentiert bei den Resultaten aber auch die Ergebnisse der beteiligten Partner an GeoMol Schweiz (Kap. 1.3.3). In

einem ersten Teil werden die geologische Übersicht (Kap. 2), der Modellaufbau (Kap. 3), die Datengrundlage (Kap. 4), die Methodik und das Vorgehen (Kap. 5) behandelt. Der zweite Teil befasst sich mit den Resultaten (Kap. 6), der Qualitätssicherung und der Unsicherheit (Kap. 7), der Anwendung der Modelle (Kap. 8), dem Zugang zu den Ergebnissen (Kap. 9) und dem Ausblick über das weitere Vorgehen (Kap. 10).

## 2. Geologischer Überblick

Tektonische Übersichtskarte

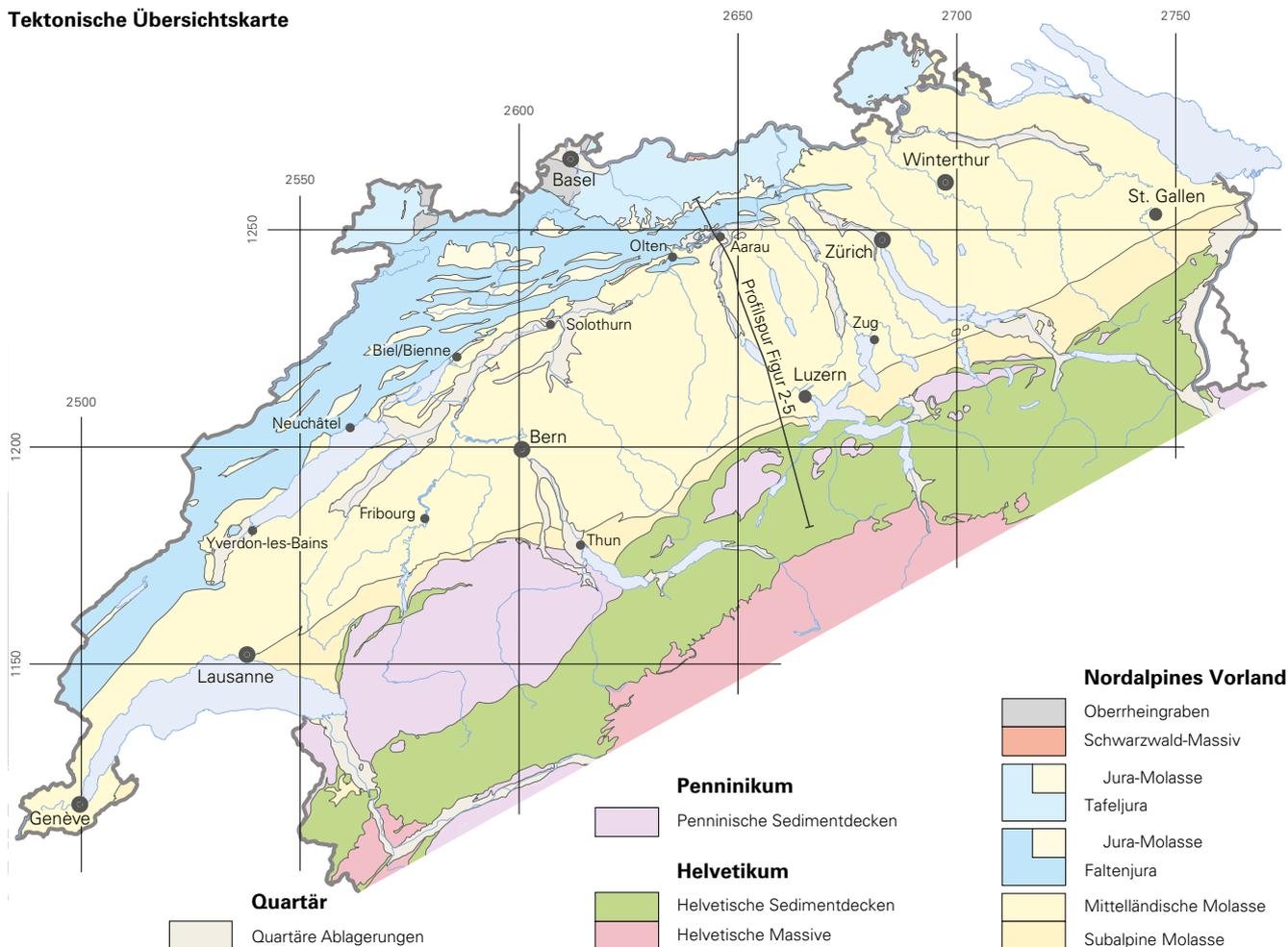


Fig. 2-1: Tektonische Übersichtskarte des Schweizer Molassebeckens und angrenzende tektonische Einheiten (SOMMARUGA et al. 2012, überarbeitet).

### 2.1 Lage und Bau des Molassebeckens

Das Schweizer Molassebecken ist ein Teil des nordalpinen Vorlandbeckens und umfasst im Wesentlichen das Schweizer Mittelland. Im Norden wird es durch die mesozoischen Sedimente des Falten- und des Tafeljuras begrenzt. Der Südrand des Beckens wird durch die nördliche Alpenfront gebildet, südlich angrenzend befinden sich penninische und helvetische Sedimentdecken (Fig. 2-1). Die Ost- und die Westgrenze des Schweizer Molassebeckens sind durch die Schweizer Landesgrenze und nicht durch geologische Gegebenheiten definiert.

Das nordalpine Vorlandbecken ist ein asymmetrisches Sedimentbecken, das sich über eine Länge von 1000 km ent-

lang der Alpen von Savoyen in Frankreich über die Schweiz, Deutschland und Österreich bis in die Tschechische Republik erstreckt. Südwestlich von Genf keilt es zwischen dem Juragebirge und den subalpinen Ketten der französischen Alpen aus, gegen Osten wird es breiter. In der Westschweiz ist das nordalpine Vorlandbecken 30 km breit, in der Zentralschweiz 50 km, in Süddeutschland erreicht seine Breite ein Maximum von 150 km (HOMEWOOD et al. 1986, IBELE 2011, GEOMOL TEAM 2015).

Die alpine Gebirgsbildung und die damit verbundene Entstehung des nordalpinen Vorlandbeckens ist die Folge der Kontinent-Kontinent-Kollision zwischen der adriatischen und der europäischen Platte. Während der alpinen Orogenese im Paläogen und Neogen stapelten sich Krus-

tenblöcke beziehungsweise Decken am zusammenge-  
stauchten Kontinentalrand, was eine Krustenverdickung  
bewirkte. Diese führte dazu, dass die europäische Kruste  
nach unten gebogen wurde, was die Bildung eines flexurel-  
len Vorlandbeckens zur Folge hatte. Dieses Becken wurde  
mit Abtragungsschutt aus den entstehenden Alpen, den  
Molassesedimenten, aufgefüllt (MATTER et al. 1980, KAR-  
NER & WATTS 1983, PFIFFNER 1986, 2009, SINCLAIR & ALLEN  
1992, SCHLUNEGGER et al. 1993, IBELE 2011). Neue Arbeiten  
von SCHLUNEGGER & KISSLING (2015) und HERWEGH et al.  
(2017) zeigen, dass die Hebung der Alpen nicht allein durch  
plattentektonisch bedingte Verkürzung, sondern zusätzlich  
auch durch Auftriebskräfte als Folge des Abreissens der ab-  
tauchenden europäischen Platte verursacht wurde.

Während der jüngsten Deckenbewegungen im alpinen  
Orogen wurde das nordalpine Vorlandbecken an seinem  
Südrand zusammengestaucht. Dabei wurde die Sediment-  
decke im westlichen Beckenteil entlang eines basalen  
Abscherhorizonts in der Anhydritgruppe der Trias abge-  
schert und nach Nordwesten geschoben. Diese Fernschub  
genannte Abscherung führte zur Bildung des Juragebirges  
am Nordrand des Vorlandbeckens (LAUBSCHER 1961, PFIFF-  
NER 2009, SOMMARUGA et al. 2012).

## 2.2 Stratigraphie und Ablagerungsgeschichte im Molassebecken

Die Ablagerungsgeschichte des nordalpinen Vorland-  
beckens gliedert sich in drei Phasen (Karbon-Perm, Trias-  
Kreide, Paläogen-Neogen), deren Bildungen jeweils durch  
eine bedeutende Diskordanz voneinander getrennt sind  
(Fig. 2-2). Das variszische kristalline Grundgebirge mit Per-  
mokarbonsedimenten in Trögen wird durch mesozoische  
Sedimente und diese wiederum durch die känozoischen  
Molassesedimente überlagert (BACHMANN & MÜLLER 1992).

Figur 2-3 zeigt eine Korrelation von sieben Tiefbohrungen  
im Molassebecken entlang einer Südwest-Nordost  
streichenden Linie. Das abgebildete Gamma-Ray-Log misst  
die in Tonmineralien vorkommende Strahlung. So unter-  
scheidet das Log tonige Sedimente (Ausschlag nach rechts)  
von anderen Sedimenten (Ausschlag nach links). Tonreiche  
Abfolgen sind im unteren Teil des Doggers (Opalinus-Ton)  
und im unteren Malm (Wildeg-Formation) erkennbar.

### 2.2.1 Karbon-Perm

Ablagerungen des Karbons und des Perms finden sich  
im Modelliergebiet innerhalb von paläozoischen Trögen.  
Diese bildeten sich während der variszischen Extension  
(McCANN 2008) und wurden dabei sukzessive mit klasti-  
schen Sedimenten aufgefüllt. Die Ablagerung der Sedimente  
erfolgte zwischen dem späten Karbon und der Perm/Trias-  
Grenze (BACHMANN & MÜLLER 1992, MÜLLER et al. 2002,  
MADRITSCH et al. 2013). Die Sedimente der Permokarbon-  
tröge erreichen Mächtigkeiten von bis zu 2500 m und umfas-  
sen fluviatilen Sandstein, Konglomerat, Silt- und Tonstein  
und vereinzelte Kohleflöze (MATTER 1987).

## Modellierte Einheiten des geologischen 3D-Modells

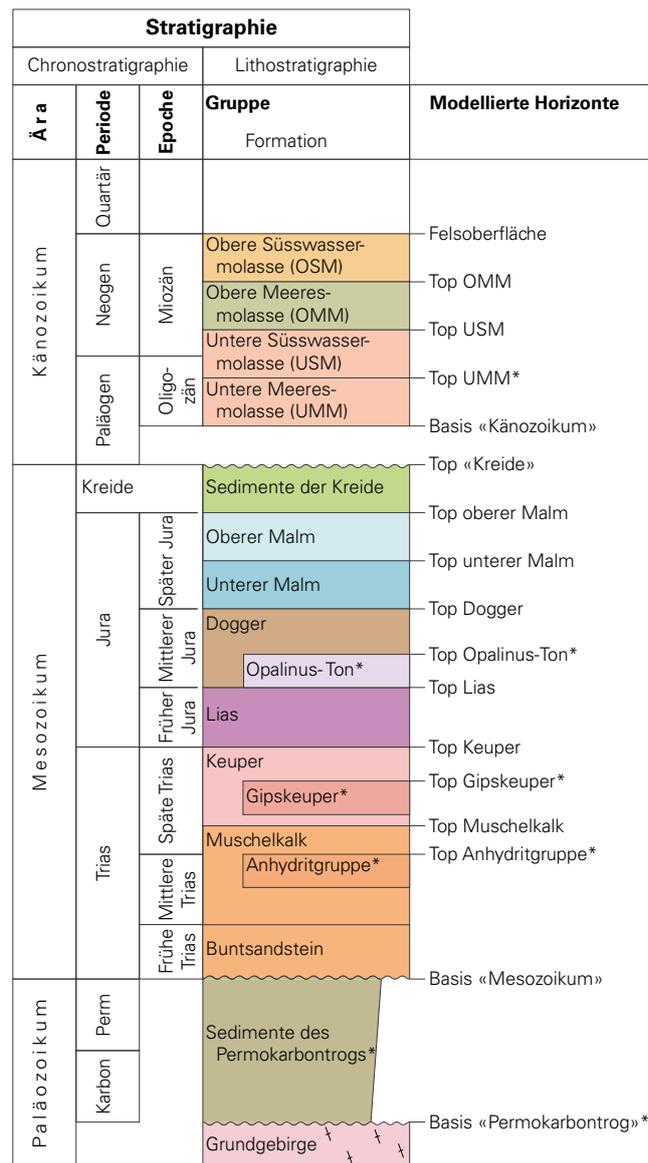


Fig. 2-2: Chrono- und lithostratigraphisches Profil des Schweizer  
Molassebeckens mit Angabe zu den im Projekt GeoMol modellierten  
Horizonten. Die mit einem Stern (\*) markierten Horizonte wurden nicht  
über das gesamte Becken modelliert (s.a. Kap. 3). Im Projekt GeoMol  
wurde die klassische Nomenklatur verwendet. Nach der Definition von  
JORDAN (2016) entspricht der Gipskeuper der Bänkerjoch-Formation,  
und die Anhydritgruppe entspricht der Zeglingen-Formation (s.a. Litho-  
stratigraphisches Lexikon der Schweiz, www.strati.ch).

### 2.2.2 Trias - Kreide

Während des Mesozoikums erfolgte die Sedimentation in  
einem epikontinentalen Bereich entlang des nordwestlichen  
Randes der Tethys. Das Grundgebirge und die Sedimente der  
Permokarbontröge wurden durch triassische und früh- bis  
mitteljurassische Sedimente in südöstlicher Richtung gradu-  
ell überdeckt (BACHMANN et al. 1987, BACHMANN & MÜLLER  
1992). Im Westschweizer Molassebecken ist eine Zunahme  
der Mächtigkeiten der mesozoischen Abfolgen, besonders  
der Evaporite der Trias, zu beobachten (Fig. 2-3), was die

Folge erhöhter Subsidenz im Bereich des periodisch weniger stabilen südeuropäischen Schelfs (SOMMARUGA et al. 2012) sein könnte.

### 2.2.2.1 Trias

Die Triasabfolge in der Nordschweiz umfasst rund 225–550 m marine bis kontinentale Sedimente. Sie wird in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper unterteilt (s.a. JORDAN 2016). Im Zuge der Harmonisierung der lithostratigraphischen Nomenklatur in der Schweiz (Projekt HARMOS, STRASKY et al. 2016) definierte JORDAN (2016) zahlreiche lithostratigraphische Einheiten der Trias neu.

#### *Buntsandstein*

Das zentrale und östliche Vorlandbecken war während der Frühen Trias Abtragungsgebiet. Die Mächtigkeit des Buntsandsteins nimmt in Richtung Südosten rasch ab; dieser keilt etwa auf der Linie Lausanne–Zürich aus (TRÜMPY 1959, 1962). Im kontinentalen Ablagerungsmilieu bildeten sich Sandstein, Konglomerat, Silt- und Tonstein, welche heute eine Mächtigkeit von insgesamt 5–25 m erreichen (SIGNORELLI et al. 2004, PFIFFNER 2009).

#### *Muschelkalk*

Über dem Buntsandstein kam unter dem Einfluss von Gezeiten die Kaiseraugst-Formation (ehemals Unterer Muschelkalk), eine geringmächtige Wechsellagerung von Mergel mit dünnen Kalk- und Dolomitbänken, zur Ablagerung. Darauf bildeten sich in einem Küstenbereich die Evaporite (Anhydrit und Steinsalz) der Zeglingen-Formation (ehemals Mittlerer Muschelkalk oder Anhydritgruppe). Der Anhydrit der Zeglingen-Formation diente später im westlichen Vorlandbecken als basaler Abscherhorizont des Faltenjuras. TRÜMPY (1959) vermutete, dass die Evaporite der Zeglingen-Formation auf das Gebiet westlich einer Linie Innertkirchen–Winterthur beschränkt sind. Die oberste Formation des Muschelkalks, die Schinznach-Formation (ehemals Oberer Muschelkalk, d.h. Trochitenkalk, Plattenkalk und Trigonodus-Dolomit), nimmt gegen Süden beziehungsweise Südosten allmählich an Mächtigkeit ab, wobei die Dolomitierung stärker wird (TRÜMPY 1962, PFIFFNER 2009).

#### *Keuper*

Die Sedimente des Keupers, bestehend aus Mergel, Sandstein, gelegentlich Kohle sowie Evaporiten, wurden unter kontinentalen Bedingungen als Ablagerung mäandrierender Flüsse in einer küstennahen Schwemmebene gebildet, in der sich gelegentlich mariner Einfluss bemerkbar machte. Diese randmarinen bis kontinentalen Bildungen werden auch «Germanischer Keuper» bezeichnet (z.B. PFIFFNER 2009). Die Mächtigkeit des Keupers wird gegen Süden und Südosten geringer, die Evaporite verschwinden, und sein Charakter wird überwiegend kontinental. Infolge prä-mitteljurassischer Erosion fehlt der Keuper gebietsweise; südlich des Juragebirges ist er hingegen sehr mächtig (TRÜMPY 1962). Im westlichsten Molassebecken dienten die Evaporite des Keupers als basaler Abscherhorizont des Faltenjuras.

### 2.2.2.2 Jura

Untiefe Karbonatplattformen mit vorgelagerten epikontinentalen Becken dominierten Mitteleuropa während des Juras und hinterliessen im Bereich des späteren Schweizer Molassebeckens mächtige Ablagerungen von vor allem Kalk, Mergel und Tonstein. Ein Wechselspiel von eustatischen Meeresspiegelschwankungen und differenzieller Subsidenz (BURKHALTER 1996, ALLENBACH 2001, WETZEL & ALLIA 2003), vermutlich entlang von reaktivierten paläozoischen Störungen, führten zu markanten lateralen Fazieswechseln, wie sie aus dem Jura Gebirge bekannt, im tieferen Untergrund jedoch weitgehend hypothetisch sind.

#### *Lias*

Das mittlere und östliche Modellgebiet lag im Bereich des Alemannischen Landes, zwischen dem Schwäbischen Becken im Nordosten und dem Pariser Becken im Südwesten. Im westlichen Modellperimeter (Region Genf und Neuenburgersee) wurden bis zu 250 m Tonstein und Mergel abgelagert, während im östlichen Modellgebiet der gesamte Lias eine Mächtigkeit von nur 25–70 m aufweist (PIEŃKOWSKI et al. 2008). Die geringe Mächtigkeit des Lias in diesem Gebiet weist auf insgesamt verminderte Subsidenz im Frühen Jura hin (PIEŃKOWSKI et al. 2008), Mächtigkeitsschwankungen zeigen allerdings differenzielle Subsidenz an. Von der Oberflächengeologie im Jura Gebirge sind abrupte Fazieswechsel und Mächtigkeitsschwankungen bekannt (REISDORF et al. 2011).

#### *Dogger*

Die unterste lithostratigraphische Einheit des Doggers im Modellperimeter ist der Opalinus-Ton. Chronostratigraphisch liegt dessen Untergrenze im nordwestlichen Modellgebiet im späten Frühen Jura und verläuft diachron nach Osten. Der Opalinus-Ton ist eine homogene Abfolge von Ton mit einzelnen siltigen und sandigen Einschaltungen, die unter marinen Bedingungen in relativ kurzer Zeit abgelagert wurde. Die zwischen in der Nordschweiz 80 m und 120 m schwankende Mächtigkeit wird als Resultat differenzieller Subsidenz entlang reaktivierter paläozoischer Störungen interpretiert (WETZEL & ALLIA 2003). Erst in Süddeutschland sind küstennahe Ablagerungen bekannt. Die den Opalinus-Ton überlagernde Passwang-Formation (BURKHALTER 1996) besteht aus Coarsening-up-Zyklen, die mit feinkörnigen kalkigen und siliziklastischen Sedimenten beginnen und am Top von Eisenoolithen begrenzt sind. Diese Zyklen wurden in einem untiefen epikontinentalen Meer gebildet. In der Folge breitete sich die Burgunder Plattform mit den Flachwasserkarbonaten des Hauptrogensteins bis in das Modellgebiet aus. Südlich und östlich an die Plattform angrenzend wurde vor allem Mergel der Klingnau-Formation abgelagert. Die Ifenthal-Formation des späteren Mittleren Juras wird durch zwei Shallowing-up-Zyklen aufgebaut. Beide beginnen mit Mergel an der Basis und gehen in Flachwasserkarbonate über (PIEŃKOWSKI et al. 2008, BLÄSI et al. 2013).

#### *Malm*

Zu Beginn des Späten Juras wurde in der Nordwestschweiz vor allem Tonstein der Bärschwil-Formation abgelagert, der

### Bohrloch-Korrelation

Gamma-Ray-Korrelation von sieben Tiefbohrungen im Schweizer Molassebecken

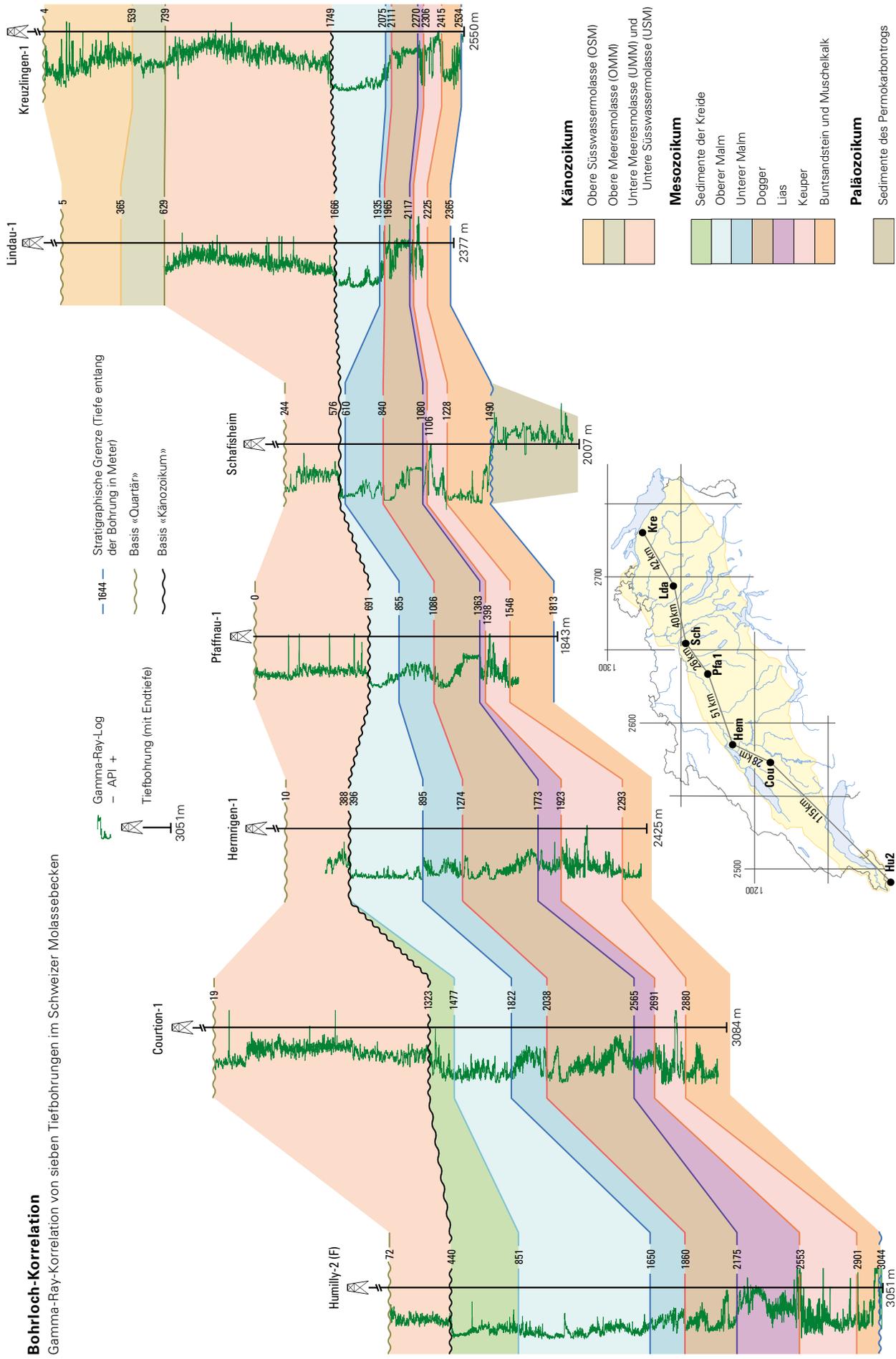


Fig. 2-3: Bohrloch-Korrelation von sieben Tiefbohrungen im Molassebecken. Das abgebildete Gamma-Ray-Log misst die natürliche Gamma-Strahlung im Gestein. Tonstein hat generell eine höhere natürliche Strahlung aufgrund von radioaktivem Kalium, welches in Tonmineralien auftritt. Die Horizont-Korrelation der modellierten Horizonte basiert auf Angaben der Projektpartner.

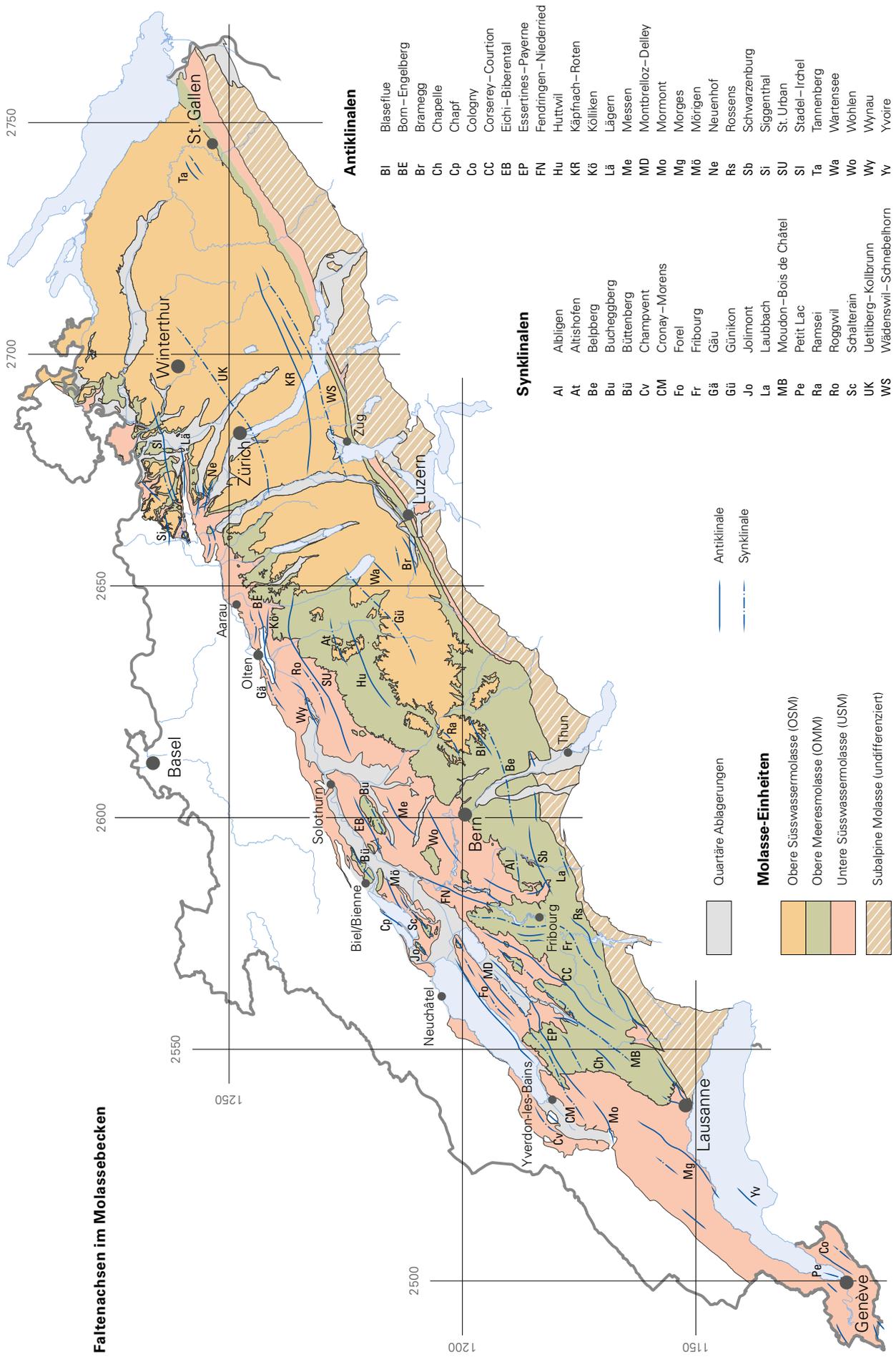


Fig. 2-4: Übersichtskarte über die aufgeschlossenen Molasse-Einheiten und die Faltenachsen im Molassebecken. Kompilation und Harmonisierung aus den tektonischen Nebenkarten des Geologischen Atlas der Schweiz 1 : 200000 und weiterer tektonischer Skizzen (s.a. Kap. 4.2.2).

anschliessend von einer von Nordwesten her progradierenden Karbonatplattform überlagert wurde. Zeitgleich herrschte über weite Teile innerhalb des restlichen Modellperimeters Nicht- oder Mangelsedimentation. Mit der Bildung einer Karbonatplattform wurden im Nordwesten vor allem Flachwasserkarbonate abgelagert. Im übrigen Modellgebiet wurde im mittleren Späten Jura Mergel mit kalkigen Einschaltungen der Wildegg-Formation abgelagert. Markante Mächtigkeitsschwankungen und auch Fazieswechsel finden sich entlang von bekannten und vermuteten paläozoischen Störungen im Kristallin, was auf eine Reaktivierung dieser Störungen deutet (ALLENBACH 2002, PIEŃKOWSKI et al. 2008).

### 2.2.2.3 Kreide

Nach einer zwischenzeitlichen Regression um die Jura/Kreide-Grenze kam es während der Frühen Kreide erneut zu einer Transgression der Tethys und der Ablagerung von flachmarinen Sedimenten (BACHMANN & MÜLLER 1992).

Sedimente der Kreide kommen heute nur westlich der Linie Biel - Thun vor; dabei ist es ungeklärt, ob die Kreide im Osten überhaupt je abgelagert wurde oder ob sie während der Festlandphase zwischen der Späten Kreide und dem Paläogen wieder erodiert wurden (PFIFFNER 2009, SOMMARUGA et al. 2012, Fig. 2-3).

### 2.2.3 Paläogen - Neogen

Im späten Eozän, möglicherweise bereits früher, kam es aufgrund der Subduktion der europäischen unter die adriatische Platte zu einer Aufwölbung im Vorland der werdenden Alpen und damit zum Trockenfallen eines Teils des europäischen Kontinentalrandes. Grossflächige Erosion und Verkarstung führten zur Bildung einer regionalen Diskordanz im Dach der mesozoischen Ablagerungen (BACHMANN & MÜLLER 1992, PFIFFNER 2009). Karsttaschen und -klüfte wurden mit siderolithischen Bildungen aufgefüllt, die durch Verwitterung der jüngsten jurassischen, eventuell auch kretazischen Schichten in einem subtropischen-semiariden Klima entstanden (WULLSCHLEGER 2005).

Zwischen der Aufwölbung im Vorland und den entstehenden Alpen entstand in der Folge das Molassebecken als flexurales Vorlandbecken, welches sukzessive mit Sedimenten aufgefüllt wurde und sich dabei mit der Zeit nach Norden verlagerte. Die känozoischen Sedimente wurden so über weite Bereiche diskordant auf einer Schichtlücke abgelagert (BACHMANN & MÜLLER 1992, PFIFFNER 2009).

Im Oligozän und Miozän erstreckte sich das Vorlandbecken längs der Zentral- und Ostalpen. Von Osten nach Westen verengte es sich am Übergang zu den Westalpen. Seine Auffüllung erfolgte in zwei Phasen. Während des Paleozäns und des frühen Oligozäns wurden in einem «Flyschstadium» tiefermarine Sedimente abgelagert, worauf im späten Oligozän und Miozän ein «Molassestadium» mit flachmarinen und kontinentalen Ablagerungen folgte. Dabei führten Hebungen und Senkungen des Beckens zum zweimaligen Vordringen und Zurückweichen eines Meeresarms, was zur

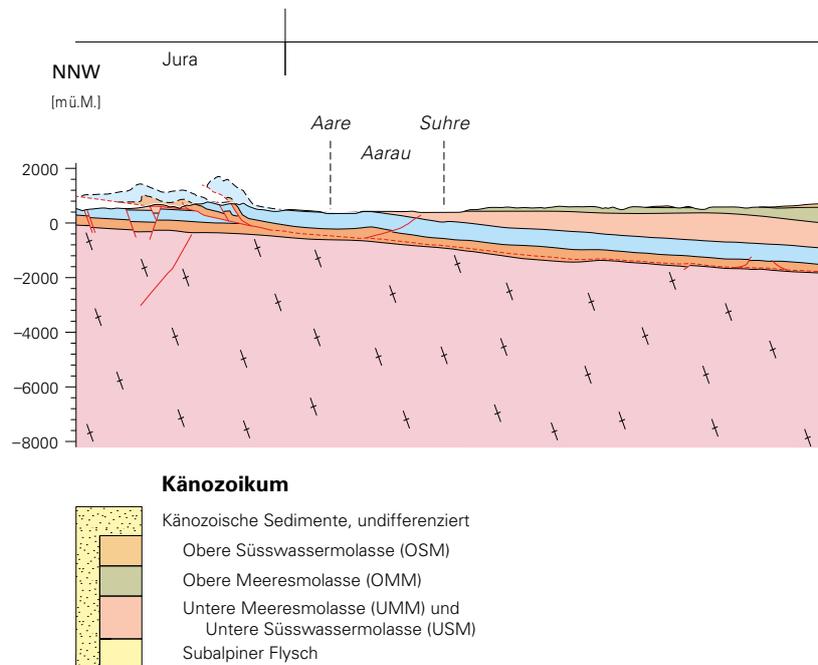


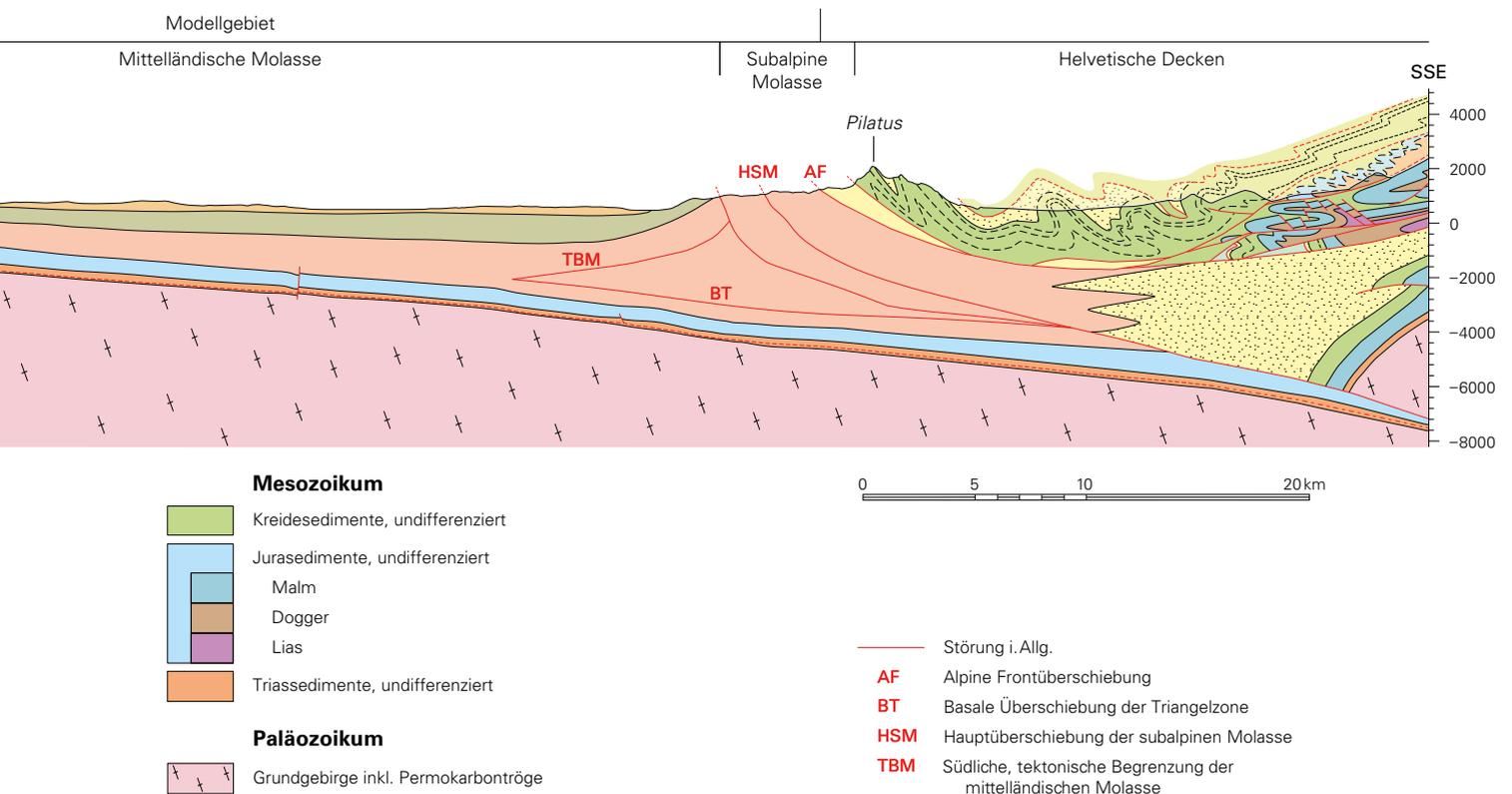
Fig. 2-5: Querprofil durch den Jura, das Molassebecken (Modellgebiet) und den Alpennordrand. Profilsur siehe Figur 2-1. Kompilation aus GeoMol17 und geologischen Profilen des Atlasblatts 135 Aarau (Profil 5, Taf. II), der GSK128 und aus JORDAN et al. (2015).

Bildung zweier Molassezyklen führte, die beide durch eine Abfolge von marinen und kontinentalen Ablagerungen charakterisiert sind (SINCLAIR 1997). Klassischerweise werden die beiden Molassezyklen (bzw. Megasequenzen) in vier lithostratigraphische Gruppen eingeteilt (z.B. MATTER et al. 1980): Untere Meeresmolasse (UMM), Untere Süsswassermolasse (USM), Obere Meeresmolasse (OMM) und Obere Süsswassermolasse (OSM).

Während der beiden Molassezyklen bildeten alpine Flüsse am Südrand des Beckens mächtige Schuttfächer beziehungsweise Deltas, die sich vom Alpenrand zum Teil Dutzende von Kilometern weit in das Becken erstreckten (HABICHT 1987).

Das Ende der Sedimentation im nicht deformierten Molassebecken war diachron. Im westlichen Teil erfolgte sie im Zuge der Faltung und Hebung des Juragebirges nach 11 Ma, im oberösterreichischen Molassebecken um etwa 6-5 Ma. Um etwa 5 Ma setzte eine verstärkte Hebung der Alpen und des Beckens in den westlichen und zentralen Alpen ein, um 4-3 Ma in den Ostalpen. Durch diese Hebung wurden im westlichen Beckenteil die Molassesedimente erodiert, weshalb die OSM heute nur noch östlich von Freiburg aufgeschlossen und erhalten ist (HOMEWOOD et al. 1986, KUHLMANN & KEMPF 2002, Fig. 2-4).

Für eine Zusammenstellung der Molasse-Einheiten sowie eine umfassende Analyse der paläogeographischen Entwicklung des Molassebeckens und des Oberrheingrabens sei auf BERGER et al. (2005a, b) verwiesen.



## 2.2.4 Quartär

Das Quartär ist durch mehrere Eiszeiten mit Gletschervorstössen, die teilweise bis weit in das heutige Mittelland und über das östliche Juragebirge reichten, gekennzeichnet. Diese bewirkten einerseits Erosion, führten andererseits aber auch zu glazialen Ablagerungen, welche die heutige Landschaftsform des Molassebeckens prägen. Die quartären Lockergesteine wurden im Projekt GeoMol nicht modelliert; der oberste modellierte Horizont im Projekt ist die Felsoberfläche, die von glazialer und fluvialer Erosion geprägt ist. Die Übertiefungen in den grossen Alpentälern erreichen Werte, die unter dem heutigen Meeresspiegel liegen (FINCKH et al. 1984). Im Mittelland ist die Felsoberfläche etwas weniger tief, weist jedoch zahlreiche Rinnen und Becken auf.

## 2.3 Tektonische Einheiten der Molasse

Die Molasse wird in drei tektonische Einheiten gegliedert. Von Nordwesten nach Südosten sind dies die Jura-Molasse, die mittelländische Molasse und die subalpine Molasse (HOFMANN 1957, HOMEWOOD et al. 1989, TRÜMPY 1980, SOMMARUGA et al. 2012, Fig. 2-1). Im Zuge der Harmonisierung der lithostratigraphischen Nomenklatur (Projekt HARMOS, STRASKY et al. 2016) wird auch die Nomenklatur der tektonischen Einheiten neu definiert werden. Im Projekt GeoMol und in diesem Bericht wird noch die bisherige Nomenklatur und Einteilung verwendet.

### 2.3.1 Jura-Molasse

Die Jura-Molasse besteht aus Sedimenten, die während der Jura-faltung mitverfaltet wurden. Durch Hebung und Erosion sind nur noch vereinzelte Vorkommen in den Synklinalen des Faltenjuras erhalten (SOMMARUGA et al. 2012). Da die Jura-Molasse ausserhalb des heutigen Molassebeckens liegt, wurde sie im Rahmen des Projekts GeoMol nicht modelliert.

### 2.3.2 Mittelländische Molasse

Die mittelländische Molasse wird in zwei tektonische Untereinheiten gegliedert, die flachliegende mittelländische Molasse sowie die aufgerichtete und gefaltete mittelländische Molasse.

Die flachliegende mittelländische Molasse macht den Hauptteil des heutigen Schweizer Molassebeckens aus; sie weist im westlichen und östlichen Teil des Beckens jeweils einen unterschiedlichen strukturellen Stil auf. Im westlichen Teil sind breite Antiklinalen mit NE-SW-Orientierung und Querstörungen mit N-S-, NW-SE- und WNW-ESE-Orientierung anzutreffen (Fig. 2-4). Die Nordgrenze der flachliegenden mittelländischen Molasse wurde an der Erosionsgrenze entlang des Juragebirges gezogen. An der südlichen Grenze, zur Triangelzone hin, richtet sich die Schichtung der mittelländischen Molasse allmählich auf und wird gefaltet. Die aufgerichtete und gefaltete mittelländische Molasse kann von nördlich der penninischen Préalpes im

Westen bis zum Rhein im Osten verfolgt werden; nördlich von Thun und östlich von St. Gallen verbreitert sie sich etwas. Ihr Strukturstil ist durch Falten dominiert, deren subvertikale Axialflächen oft zerschert sind (HABICHT 1945, HOFMANN 1955, 1956, SOMMARUGA et al. 2012).

### 2.3.3 Subalpine Molasse

Südlich an die mittelländische Molasse anschliessend ist die subalpine Molasse entlang einer schmalen Zone aufgeschlossen, welche der Front der helvetischen und penninischen Sedimentdecken vorgeschaltet ist. Diese Zone ist durch einen Stapel von intern deformierten, steilstehenden Überschiebungsdecken aus Molassesedimenten geprägt.

Die nördliche Grenze der subalpinen Molasse ist eine strukturelle Übergangszone, welche durch nordwestvergente Überschiebungen charakterisiert ist. Östlich der Aare sind die Molassesedimente durch eine komplexe Triangelzone (s.a. Kap. 2.4.5) mit Rücküberschiebungen und Duplexaufschiebungen geprägt.

Die Sedimente der südlichsten subalpinen Molasse wurden im Oligozän durch die vorstossende alpine Front tektonisch überprägt und später durch den alpinen Deckenstapel überfahren. So reichen die Überschiebungen in der subalpinen Molasse unter dem alpinen Deckenstapel bis an die Basis der känozoischen Sedimente (BACHMANN et al. 1982, VOLLMAYR & WENDT 1987, VOLLMAYR 1992, MÜLLER et al. 2002, PFIFFNER 2009, SOMMARUGA et al. 2012, Fig. 2-5).

## 2.4 Tektonische Entwicklung des Molassebeckens

Bei der tektonischen Entwicklung des Molassebeckens im Paläo- und Neogen spielte die Plattenkollision bei der Entstehung des nordalpinen Vorlandbeckens eine wesentliche Rolle. Aber auch weitere tektonische Gegebenheiten und Prozesse hatten einen Einfluss auf die Entwicklung der Strukturen im heutigen Molassebecken (IBELE 2011):

- Vererbte Strukturen des früheren europäischen passiven Kontinentalrandes, wie Permokarbontröge, ebenso die Verteilung der triassischen Evaporite,
- Bildung des Oberrhein-Bresse-Grabensystems im Eozän-Oligozän,
- Möglicherweise anhaltende Verkürzung der Alpen und die damit verbundene Exhumation/Hebung der externen Kristallinmassive und
- Fernschub und Bildung des Jura-Gebirges im späten Miozän.

Als Folge dieser verschiedenen tektonischen Gegebenheiten und Prozesse weisen der westliche und der östliche Teil des Schweizer Molassebeckens strukturelle Unterschiede auf. Im Westschweizer Molassebecken ist die Störungsdichte in den mesozoischen Sedimenten viel höher, und die Strukturen sind durch SW-NE verlaufende Antiklinalen charakterisiert (Fig. 2-4). Im Vergleich dazu sind im zentralen und östlichen Teil des Schweizer Molassebeckens die Deformationszonen und Abscherhorizonte vor allem in

den känozoischen Sedimentabfolgen anzutreffen. In seismischen Daten sind innerhalb paläozoischer und mesozoischer Sedimentabfolgen Abschiebungen, welche parallel zum Becken eine WSW-ENE-Orientierung aufweisen, sichtbar. Einige dieser Störungen reichen bis in die känozoischen Sedimentabfolgen (BACHMANN et al. 1982, BACHMANN & MÜLLER 1992, DIEBOLD & NOACK 1997, LÜSCHEN et al. 2004, PFIFFNER 2009, IBELE 2011, SOMMARUGA et al. 2012).

### 2.4.1 Bildung von Permokarbontrögen

Im späten Karbon begann sich im variszischen Grundgebirge ein Trogsystem zu bilden. Viele dieser Permokarbontröge in Frankreich, in der Schweiz und in Deutschland weisen eine Halbgrabengeometrie auf; in der Nordschweiz verlaufen sie gemäss derzeitigem Wissensstand mehrheitlich in ENE-WSW-Richtung (BACHMANN & MÜLLER 1992, NAEF & MADRITSCH 2014). Die meisten Autoren sind sich einig, dass für ihre Bildung ein Zusammenspiel verschiedener Störungssysteme verantwortlich ist (z.B. DIEBOLD et al. 1991, HENK & TIMMERMAN 2005, ZIEGLER 2005, MCCANN et al. 2006, NAEF & MADRITSCH 2014). MCCANN et al. (2006) und NAEF & MADRITSCH (2014) ziehen eine «Pull-Apart»-Kinematik bei der Bildung einzelner Permokarbontröge in Betracht. Während der Entstehung der Tröge waren auch steilstehende Störungen aktiv (z.B. ZIEGLER 1990, FAURE 1995, MCCANN et al. 2006, NAEF & MADRITSCH 2014), die in den meisten Fällen die randliche Begrenzung der Permokarbontröge bilden und deren Aktivität die Sedimentation im jeweiligen Trog steuerte (BACHMANN & MÜLLER 1992, NAEF & MADRITSCH 2014).

Die Trograndstörungen der Permokarbontröge wurden später teilweise reaktiviert, so zum Beispiel im Westschweizer Molassebecken in der Region Genf. Dort wurden die NE-SW- und NW-SE-orientierten Blattverschiebungen, die sich vom Faltenjura bis zur Alpenfront verfolgen lassen, als im Paläogen und Neogen mehrmals reaktivierte paläozoische Sockelstörungen identifiziert (GORIN et al. 1993, SOMMARUGA et al. 2012). Auch in der Nordschweiz gibt es gut dokumentierte Hinweise auf eine Reaktivierung von Permokarbontrögstörungen im Zusammenhang mit der Bildung des Molassebeckens (DIEBOLD & NOACK 1997).

Störungen im Grundgebirge bei Freiburg weisen einen vergleichbaren Charakter wie die der Permokarbontröge auf und können allenfalls sogar als Randstörungen eines Permokarbontrögs interpretiert werden. Diese Störungen wurden während der Riftingphase des Oberrhein-Bresse-Grabensystems reaktiviert. Eine Korrelation dieser Grundgebirgsstörungen mit den Störungen in den darüber liegenden Sedimentschichten kann aufgrund des ähnlichen Deformationsstils, der Orientierung und Lokalisierung der Störungen mithilfe seismischer Interpretationen und der Anordnung von Erdbebenequivalenten vorgenommen werden (KASTRUP et al. 2007).

### 2.4.2 Entwicklung des nordalpinen Vorlandbeckens

Die Entwicklung des nordalpinen Vorlandbeckens begann am südlichen Schelfrand Europas mit der Subduktion

der europäischen Platte unter die adriatisch(-afrikanische) Platte und der Transgression der Tethys im Späten Eozän. In der Folge bildete sich das alpine Orogen durch Verdickung der Kruste. Die tektonische Auflast der alpinen Decken auf die Lithosphäre und die Sedimentlast im Vorlandbecken durch den Abtragungsschutt aus dem entstehenden Orogen bewirkten die Subsidenz im Molassebecken. Dabei begünstigte der Dehnungsdruck, induziert durch das flexurelle Umbiegen der Kruste, die Entwicklung von hauptsächlich beckenparallelen anti- und synthetischen Abschiebungen in den mesozoischen Sedimenten. Der Spannungsdruck auf das Vorlandbecken bewirkte zudem eine Reaktivierung des permokarbonen Störungssystems (BACHMANN et al. 1982, BACHMANN & KOCH 1983, KARNER & WATTS 1983, PFIFFNER 1986, 2009, BACHMANN et al. 1987, SINCLAIR & ALLEN 1992).

### 2.4.3 Einfluss des Oberrheingrabens

Nordwestlich angrenzend an das Juragebirge befindet sich das Oberrhein-Bresse-Grabensystem, dessen beiden Gräben durch eine Transformstörungenzone verknüpft sind. Es ist Teil des känozoischen europäischen Riftsystems, das von der Nordsee bis nach Südfrankreich reicht (ZIEGLER 1990). Die Hauptphase der Bildung des Oberrheingrabens, dessen Störungsmuster NNE-SSW-orientiert ist, fand während des späten Eozäns und im Oligozän statt (BERGER et al. 2005a, HINSKEN et al. 2007).

Mehrere NNE-SSW-orientierte Störungen durchqueren den Faltenjura. Auch im Schweizer Molassebecken westlich von Bern sind gleich orientierte Querstörungen nachgewiesen oder werden vermutet. Diese Querstörungen sind mit der Entstehung des Oberrheingrabens assoziiert beziehungsweise wurden als seine südliche Verlängerung gedeutet (REVERTERA 1927, PLANCHEREL 1979, RYBACH et al. 1980, KASTRUP et al. 2007, LAUBSCHER 2008, MEIER 2010, IBELE 2011).

### 2.4.4 Fernschub und Bildung des Juras

Die Stapelung und Hebung der externen Kristallinmassive in den Zentralalpen verursachte im westlichen und zentralen Teil des Schweizer Molassebeckens die Abscherung der Sedimentdecke vom paläozoischen Grundgebirge und deren Transport entlang eines basalen Abscherhorizonts in der Anhydritgruppe der Trias in Richtung Nordwesten (LAUBSCHER 1961, BURKHARD 1990, SCHMID et al. 1996). Durch diesen – als Fernschub bezeichneten – Vorgang im späten Miozän bildete sich am Nordrand des nordalpinen Vorlandbeckens das Juragebirge. Der Mechanismus des Fernschubs ist als Schubübertragung von den Alpen zum Jura zu erklären. Gemäss der gängigen Lehrmeinung wurden das Grundgebirge und die Permokarbontröge von der Fernschubtektonik nicht wesentlich beeinflusst (LAUBSCHER 1961, PFIFFNER 2009).

Die östliche Begrenzung des Juragebirges ist die Lägern-Antiklinale, die eine im Abscherhorizont wurzelnde Überschiebung beinhaltet. Die laterale Kontinuität des Abscherhorizonts weiter Richtung Osten ist unklar, ebenso ist die nördliche Begrenzung der durch den Fernschub verursach-

ten Deformation nicht scharf (NAGRA 2008). Östlich von Zürich wird die Deformationsfront mit blinden Überschiebungen in der mittelländischen Molasse assoziiert. Östlich der Bohrung Lindau-1 dürfte der Abscherhorizont fehlen, da die evaporitischen Serien in die gleiche Richtung zunehmend geringmächtiger werden und die triassischen Schichten im Nordosten auf dem Grundgebirge (Böhmisches Massiv) auskeilen. Der Übergang des abgescherten zum autochthonen nordalpinen Vorland wird auf einer Verlängerungslinie der Neuhausen-Störungszone nach Südosten in Richtung Hörnli und Neckertal vermutet. So gibt es in der östlichen Schweiz, in Deutschland und in Österreich keine deutliche alpine Deformationsfront nördlich der subalpinen Molasse (BURKHARD 1990, IBELE 2011, SOMMARUGA et al. 2012, ORTNER et al. 2015).

Durch den Fernschub wurde der Sedimentstapel des Molassebeckens passiv über eine Distanz transportiert, welche der Verkürzung im Juragebirge entspricht. Diese Verkürzungsdistanz wird entlang des Juragebirges von West nach Ost kleiner, entsprechend wurde der Sedimentstapel des Molassebeckens differentiell mit einer Rotation im Uhrzeigersinn transportiert (LAUBSCHER 1961, BURKHARD 1990, KEMPF et al. 1998, IBELE 2011). Ein Teil der Verkürzungsdistanz wird auch an Querstörungen ausgeglichen.

### 2.4.5 Bildung der Triangelzone

Vermutlich führte die zeitgleich mit dem Fernschub und der Faltenbildung im Juragebirge erfolgte Hebung der externen Kristallinmassive in den Sedimenten der subalpinen Molasse östlich des Thunersees zur Bildung einer komplexen Triangelzone, welche Überschiebungen und Rücküberschiebungen beinhaltet. Die Verkürzung in der subalpinen Molasse nimmt von West nach Ost zu, entsprechend der Verkürzungsabnahme der mesozoischen Schichten und der mittelländischen Molasse infolge des Fernschubs (BURKHARD 1990, BACHMANN & MÜLLER 1992, SOMMARUGA et al. 2012).

### 2.4.6 Neotektonik

Verschiedene Hinweise deuten im Westschweizer Molassebecken auf neotektonische Aktivität an Querstörungen hin, welche sich aus dem Juragebirge bis in das Molassebecken verfolgen lassen, (VOUILLAMOZ et al. 2017). Diese Aktivität kann einer Reaktivierung von steilstehenden Grundgebirgsstörungen zugeordnet werden (KASTRUP et al. 2004, NAGRA 2008, IBELE 2011).

### 3. Modellaufbau

Im Folgenden werden alle im Projekt GeoMol modellierten Horizonte beschrieben. Ein Horizont ist als Trennfläche zwischen zwei lithostratigraphischen Einheiten definiert. Deswegen wird hier auf eine ausführliche lithostratigraphische Beschreibung der Einheiten verzichtet (s. dazu Lithostratigraphisches Lexikon der Schweiz, [www.strati.ch](http://www.strati.ch)). Da das Projekt GeoMol vor der Finalisierung der neuen lithostratigraphischen Einteilung gestartet wurde, entspricht die Definition der modellierten Horizonte (Fig.2-2) nicht immer der Einteilung nach dem Lithostratigraphischen Lexikon der Schweiz.

Nicht alle Horizonte wurden beckenweit und im selben Detaillierungsgrad modelliert. Die meisten modellierten Horizonte basieren auf seismischen Grundlagedaten und Bohrdaten, einige wurden jedoch nur mithilfe von Bohrdaten und infolgedessen mit Mächtigkeitsverteilungen erstellt, wieder andere basieren auf Bohrdaten, geologischen Karten und Profilen.

Um einen Überblick über die verschiedenen Modelle, die modellierten Horizonte der Modelle und deren Grundlagedaten aus dem Projekt GeoMol zu erhalten, wurden zwei Tabellen erstellt.

Die Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über GeoMol15 mit den Pilotmodellen, deren Grundlagedaten und den Bezeichnungen derselben Horizonte im angrenzenden Ausland (Frankreich, Deutschland und Österreich).

Die Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht über die modellierten Horizonte und deren Grundlagedaten aus GeoMol17 mit den einzelnen Teilmodellen.

Die Geschwindigkeitsdaten der wichtigsten Tiefbohrungen des Molassebeckens wurden auf Basis der Studien von ROTH et al. (2010) und MEIER (2010) überarbeitet. In diesen Studien sind synthetische Seismogramme abgebildet, welche eine gute Ausgangslage für die Interpretation der Seismik bieten. Um die teils grossen Flächen ohne zuverlässige Informationen zwischen den Tiefbohrungen zu füllen, wurde versucht, markante Reflektoren oder eine seismische Fazies einem Markerhorizont beziehungsweise einer stratigraphischen Einheit zuzuweisen. Einige der auf der Seismik kartierten Markerhorizonte entsprechen markanten lithologischen Änderungen, wie sie auch an Formationsgrenzen in der Oberflächengeologie oder Bohrprofilen auftreten. Markante lithologische Wechsel können auch markante Änderungen im seismischen Signal verursachen, beispielsweise der Wechsel von Ton zu Kalk oder Evaporit zu Kalk. Weil aber die mesozoischen Sedimente auch laterale Fazieswechsel und graduelle Übergänge (z.B. Ton-Mergel-Kalk) aufweisen, sind die Markerhorizonte in der Seismik mehr oder weniger gut kartierbar. Abgesehen von der Lithologie haben auch die Heterogenität der seismi-

schen Daten und die variablen Tiefenlagen der interpretierten Horizonte einen negativen Einfluss auf die Qualität des seismischen Abbilds. Deshalb ist es nicht unbedingt möglich, jeder lithostratigraphischen Einheit beckenweit einzelne Reflektoren oder Reflektorenpakete zuzuordnen (ROTH et al. 2010). In den Dimensionen der einzelnen Teilmodelle von GeoMol17 ist es jedoch eher möglich, charakteristische Reflektoren (oder Abfolgen) zu identifizieren. Eine Übersicht über das seismische Signal der Markerhorizonte in den Teilmodellen ist in der Tabelle A5-1 (s. Datenträger) zusammengefasst.

Die in Kapitel 3.1, Kapitel 3.2 und Kapitel 3.3 beschriebenen Zusammenhänge zwischen den auf der Seismik interpretierten Horizonten und deren lithologischen Ursachen, wurden aus den Arbeiten von MEIER (2010), ROTH et al. (2010), SOMMARUGA et al. (2012), CLERC (2016), GRUBER et al. (2016), HUGGENBERGER et al. (2016), MARCHANT & BAUER (2016), MOCK (2016) und eigenen Beobachtungen zusammengetragen.

#### 3.1 Karbon-Perm

##### *Basis «Permokarbondrog» (BPK)*

Im Projekt GeoMol wurde von den Permokarbontrögen in der Schweiz nur ein Teil des Nordschweizer Permokarbontrögs in der Region Aarau-Laufenburg-Benken-Winterthur modelliert. Der Nordschweizer Permokarbontrög wurde in den 80er Jahren von der Nagra erbohrt (SPRECHER & MÜLLER 1986). Die Kenntnisse darüber stammen aus der Interpretation von reflexionsseismischen Daten und zum Grossteil aus Nagra- und Erdöl-Tiefbohrungen. Vermutlich zieht dieser Trög durch die ganze Nordschweiz von der Ajoie bis zum Bodensee (DIEBOLD et al. 1991).

Eine weitere lithostratigraphische Unterteilung der Sedimente aus dem Karbon-Perm erfolgte nicht. Grundlage für die Modellierung des Horizonts Basis «Permokarbondrog» im Projekt GeoMol waren hauptsächlich Daten aus der Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) der Nagra (NAGRA 2014).

#### 3.2 Trias-Kreide

##### *Basis «Mesozoikum» (BMes)*

Der tiefste durchgehend modellierte Horizont im Projekt GeoMol ist der Horizont Basis «Mesozoikum». Er entspricht der Erosionsfläche auf dem Kristallinen Grundgebirge beziehungsweise auf den Sedimenten der Permokarbontröge

Tab. 3-1: Übersicht über die modellierten Horizonte von GeoMol15 und der Pilotmodelle sowie der Vergleich der Bezeichnungen CH-EU.

Modelle	GeoMol15	Pilotmodell Genf – Savoyen	Bezeichnung im GeoMol-EU-Projekt (F)	Pilotmodell Schweizer Mittelland	Pilotmodell Bodensee – Allgäu	Bezeichnung im GeoMol-EU-Projekt (D, A)
Modellierte Horizonte						
Tfels Felsoberfläche	p, Isohypsenkarten, Felsmodelle		Basis Quartär			Basis Lockergestein
TOSM Top OSM	entspr. TFels	–	–	entspr. TFels	entspr. TFels	n/a
TOMM Top OMM	p	–	–	p	s	Basis Obere Süswassermolasse
TUSM Top USM	p	–	–	p	s	Basis Obere Meeremolasse
TUMM Top UMM	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
BKän Basis «Känozoikum»	s	s	Basis Tertiär	s	s	Basis Tertiär
TKre Top «Kreide»	entspr. BKän	entspr. BKän	n/a	entspr. BKän	–	–
TUMa Top oberer Malm	s	s	Top Oberer Jura	s	entspr. BKän	n/a
TLMa Top unterer Malm	s	s	n/a	s	s	Top Impressamergel-Fm.
TDo Top Dogger	s	s	Top Mittlerer Jura	s	s	Top Mitteljura
TOpa Top Opalinus-Ton	n/a	n/a	n/a	t	n/a	n/a
TLi Top Lias	s	s	Top Unterer Jura	s	s	Top Unterjura
TKeu Top Keuper	s	s	Top Trias	s	s	Top Trias
TGips Top Gipskeuper	n/a	n/a	n/a	t	t	Top Unterkeuper
TMus Top Muschelkalk	s	s	n/a	s	s	Top Muschelkalk
TAnhy Top Anhydritgruppe	n/a	n/a	n/a	n/a	t	Top Heilbronn-Fm.
BMes Basis «Mesozoikum»	s	s	Top Grundgebirge	s	s	Top Paläozoikum

Legende:

- Nicht vorhanden im Modelliergebiet
- n/a Nicht modelliert
- s Interpretation seismischer Sektionen
- t Aus Mächtigkeitsverteilungen
- p Mithilfe Bohrdaten, geologischer Karten und Profilen

Tab. 3-2: Übersicht über die modellierten Horizonte und deren Grundlagedaten der einzelnen Teilmodelle aus GeoMol17.

Teilmodelle Modellierte Horizonte	Genf	Waadt	Freiburg	Bern	Landesgeologie untiefes Modell NW	Landesgeologie untiefes Modell NE	Landesgeologie tiefes Modell	Bodensee
Modellierung aus Bohrdaten, Isohypsenkarten und Felsmodellen								
TFels Felsoberfläche	-	-	n/a	entspr. TFels	n/a	entspr. TFels	entspr. TFels	entspr. TFels
TOSM Top OSM	-	entspr. TFels	entspr. TFels	p	entspr. TFels	p	p	s
TOMM Top OMM	entspr. TFels	s	p	p	p	p	p	s
TUSM Top USM	-	s	t (konzeptionell)	n/a	-	-	n/a	n/a
TUMM Top UMM	s	s	s	s	p	p	s	s
BKän Basis «Känozoikum»	entspr. BKän	entspr. BKän	entspr. BKän	entspr. BKän	-	-	-	-
TKre Top «Kreide»	s	s	s	s	entspr. BKän	entspr. BKän	entspr. BKän	entspr. BKän
TUMa Top oberer Malm	s	s	s	s	s	s	s	s
TLMa Top unterer Malm	s	s	s	s	s	t	s	s
TDo Top Dogger	s	s	s	s	p	p	s	s
TLi Top Lias	s	s	s	s	p	p	s	s
TKeu Top Keuper	s	s	s	s	p	t	s	s
TMus Top Muschelkalk	s	s	s	s	p	p	s	s
BMes Basis «Mesozoikum»	s	s	s	s	p	p	s	s
BPK Basis «Permokarbondrog»	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	p	n/a	n/a

## Legende:

- Nicht vorhanden im Modelliergebiet
- n/a Nicht modelliert
- s Interpretation seismischer Sektionen
- t Aus Mächtigkeitsverteilungen
- p Mithilfe Bohrdaten, geologischer Karten und Profilen

und der Basis der mesozoischen Sedimente. Die Modellierung des Horizonts Basis «Mesozoikum» basiert auf seismischen Interpretationen und Bohrdaten.

Der Markerhorizont Basis «Mesozoikum» hat über das ganze Modellgebiet einen sehr variablen seismischen Charakter, was auf die wechselnden Lithologien im Hangenden wie auch im Liegenden zurückzuführen ist (ROTH et al. 2010, MADRITSCH et al. 2013).

#### ***Top Anhydritgruppe (TAnhy)***

Der modellierte Horizont Top Anhydritgruppe (Mittlerer Muschelkalk) entspricht dem Top der Zeglingen-Formation (JORDAN 2016) und wurde nur in der Pilotregion Bodensee-Allgäu und mittels Mächtigkeitsverteilungen aus Bohrdaten modelliert. Im Abschlussbericht der Pilotregion Bodensee-Allgäu (GEOMOL LCA-PROJEKTTEAM 2015) ist die Bezeichnung des Horizonts Top Heilbronn-Formation.

#### ***Top Muschelkalk (TMus)***

Der modellierte Horizont Top Muschelkalk entspricht dem Top des Stamberg-Members (ehemals Trigonodus-Dolomit des Oberen Muschelkalks). Er entspricht demnach nicht dem Top Muschelkalk nach der aktuellen Einteilung nach dem Lithostratigraphischen Lexikon der Schweiz (www.strati.ch). Grundlagedaten für die Modellierung des Top-Muschelkalk-Horizonts waren seismische Interpretationen und Tiefbohrungen.

Der Reflektor, auf dessen Basis der Top-Muschelkalk-Horizont interpretiert wurde, dürfte über weite Gebiete auf den Wechsel vom harten Dolomit des Stamberg-Members zu den weichen Evaporiten und Mergeln des Keupers zurückzuführen sein. Im Gegensatz zum dolomitischen Stamberg-Member liegt der geringmächtige Asp-Member unterhalb der seismischen Auflösung und bildet auch keinen Impedanzkontrast zu den Mergeln und Evaporiten im Hangenden.

#### ***Top Gipskeuper (TGips)***

Der modellierte Horizont Top Gipskeuper entspricht dem Top der Bänkerjoch-Formation (ehemals Mittlerer Keuper) und wurde nur in den beiden Pilotregionen Schweizer Mittelland und Bodensee-Allgäu mittels Mächtigkeitsverteilungen aus Bohrdaten modelliert.

#### ***Top Keuper (TKeu)***

Der modellierte Horizont Top Keuper entspricht dem Top der Klettgau-Formation. Grundlagedaten für die Modellierung vom Top-Keuper-Horizont waren seismische Interpretationen, Tiefbohrungen und am Nordrand des Molassebeckens auch geologische Profile.

Vor allem im westlichen Modellgebiet ist der Top-Keuper-Horizont in der Seismik gut kartierbar. Das dürfte an der sandigen Ausbildung der obersten Trias («Rhät») liegen, welche einen guten seismischen Kontrast zu den Evaporiten und Mergeln im Liegenden bildet. Im östlichen Modellgebiet ist der Lias derart geringmächtig, dass Top Keuper und Top Lias schwer zu trennen sind.

#### ***Top Lias (TLi)***

Der modellierte Horizont Top Lias entspricht dem Top der Staffelegg-Formation. Grundlagedaten für die Modellierung des Top-Lias-Horizonts waren seismische Interpretationen, Tiefbohrungen und am Nordrand des Molassebeckens auch geologische Karten und Profile.

Auf Geschwindigkeitslogs von Tiefbohrungen (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) im Molassebecken ist die Lias/Dogger-Grenze an einem deutlichen Sprung zu erkennen. Lithologisch dürfte dieser Sprung dem Übergang von der gebankten, etwas kalkigeren oberen Staffelegg-Formation zum Tonstein des Opalinus-Tons entsprechen (REISDORF pers. Mitt.).

#### ***Top Opalinus-Ton (TOpa)***

Der Horizont Top Opalinus-Ton wurde nur in der Pilotregion Schweizer Mittelland mittels Mächtigkeitsverteilungen aus Bohrdaten modelliert. Das seismische Abbild sei hier trotzdem erwähnt, weil der Opalinus-Ton oft als eine transparente seismische Fazies gut erkennbar ist. Lediglich die Obergrenze ist schwer zu erfassen, da sie in einem Übergang von Ton zu mergeligem Kalk der Passwang-Formation und dessen lateralen Äquivalenten des unteren Doggers liegt.

#### ***Top Dogger (TDo)***

Der modellierte Horizont Top Dogger entspricht dem Top der Ifenthal-Formation. Grundlagedaten für die Modellierung des Top-Dogger-Horizonts waren seismische Interpretationen, Tiefbohrungen und für die Anbindung an die Ausbisslinien am Nordrand des Molassebeckens auch geologische Karten und Profile.

Im westlichen und mittleren Modellgebiet entspricht der Top-Dogger-Horizont einem deutlichen und kontinuierlichen Reflektor (SOMMARUGA et al. 2012), welcher auf den Impedanzkontrast zwischen dem harten Kalk des oberen Doggers und den mergeligen Abfolgen des unteren Malm zurückzuführen ist. Bedingt durch einen geringen Impedanzkontrast an der Dogger/Malm-Grenze ist der Top-Dogger-Horizont im östlichen Modellgebiet auf der Seismik eher schlecht abgebildet (ROTH et al. 2010).

#### ***Top unterer Malm (TLMa)***

Der modellierte Horizont Top unterer Malm entspricht dem Top des Effingen-Members der Wildeggen-Formation. Im Abschlussbericht der Pilotregion Bodensee-Allgäu (GEOMOL LCA-PROJEKTTEAM 2015) ist die Bezeichnung des Horizonts Top Impressamergel-Formation, entsprechend dem lateralen Äquivalent des Effingen-Members im süddeutschen Raum. Grundlagedaten für die Modellierung des Horizonts Top unterer Malm waren Tiefbohrungen, seismische Interpretationen und für die Anbindung an die Ausbisslinien am Nordrand des Molassebeckens auch geologische Karten und Profile.

Oftmals ist auf der Seismik eine transparente seismische Fazies erkennbar, welche dem Mergel des Effingen-Members entspricht. Je nach Ausbildung des oberen Effingen-Members und dem Hangenden ist ein mehr oder weniger deutlicher Reflektor erkennbar.

### **Top oberer Malm (TUMa)**

Der modellierte Horizont Top oberer Malm entspricht dem Top des Malms und, dort wo keine Sedimente der Kreide im Molassebecken vorkommen, dem modellierten Basis-«Känozoikum»-Horizont. Grundlagedaten für die Modellierung des Horizonts Top oberer Malm waren seismische Interpretationen, Tiefbohrungen und für die Anbindung an die Ausbisslinien am Nordrand des Molassebeckens auch geologische Karten und Profile.

Der Horizont Top oberer Malm ist auf der Seismik schwer zu erkennen. Erschwerend wirkt die Überschattung des Reflektors durch den kräftigen BKän-Reflektor, wie auch die variable Lithologie im Hangenden.

### **Top «Kreide» (TKre)**

Die Sedimente der Kreide kommen im Modelliergebiet nur westlich der Linie Biel–Thun vor (Fig. 2-3). Ein eigentlicher Horizont Top «Kreide» ist – bedingt durch die erosive Basis des Känozoikums – im Modellgebiet nicht vorhanden. In der Region, wo Sedimente der Kreide vorkommen, entspricht daher der Top-«Kreide»-Horizont dem modellierten Basis-«Känozoikum»-Horizont. Zur Abgrenzung des Horizonts Top «Kreide» wurde die Erosionsgrenze mithilfe von Bohrungen und seismischen Interpretationen erstellt, indem die Unter- und Obergrenze der Sedimente der Kreide (BKän und TUMa) interpretiert wurden.

## **3.3 Paläogen–Neogen**

### **Basis «Känozoikum» (BKän)**

Der modellierte Horizont Basis «Känozoikum» entspricht der verkarsteten Erosionsfläche zwischen den jüngsten mesozoischen Sedimenten und der Basis der känozoischen Sedimente. Grundlagedaten für die Modellierung des Horizonts Basis «Känozoikum» waren seismische Interpretationen, Bohrungen und für die Anbindung an die Ausbisslinien am Nordrand des Molassebeckens geologische Karten und Profile.

Der seismische Ausdruck des Markerhorizonts Basis «Känozoikum» ist in der Regel ein markantes Band oder Reflektorpaket mit unterschiedlichen Polaritäten. Laterale Variationen sind auf die Verkarstung der Erosionsfläche Basis «Känozoikum» zurückzuführen (ROTH et al. 2010). Auch lokale Onlaps (SOMMARUGA et al. 2012) auf den oberen Malm sind ein deutliches Indiz für die ersten känozoischen Schüttungen auf die mesozoischen Sedimente.

### **Top Untere Meeresmolasse (TUMM)**

Der Horizont Top Untere Meeresmolasse wurde subparallel zum Basis-«Känozoikum»-Horizont und einer geringen Mächtigkeitzunahme Richtung Südost mithilfe von Bohrdaten und – wo möglich – seismischen Interpretation mo-

delliert. Im Modelliergebiet Genf existiert der Top-UMM-Horizont nicht. Im Teilmodell Waadt wurde er mithilfe seismischer Interpretationen auf drei seismischen Sektionen und mitteltiefen Bohrungen modelliert. Im Teilmodell Freiburg wurde ein konzeptioneller Top-UMM-Horizont modelliert, dessen nördliche Begrenzung NE–SW parallel zum Molassebecken orientiert ist und nördlich der Bohrungen Romanens-1, Sorens-1, Savigny-1, Thun-1 und Linden-1 auskeilt. In den anderen, weiter östlichen Teilmodellen war es aufgrund zu weniger Grundlagedaten nicht möglich, den Top-UMM-Horizont zu modellieren.

### **Top Untere Süßwassermolasse (TUSM)**

Am Südrand des Molassebeckens entspricht der Horizont Top Untere Süßwassermolasse dem Top der USM-II und nicht USM-III (BERGER et al. 2010), da diese als das terrestrische Äquivalent der OMM innerhalb dieser Einheit modelliert wurde. Das nicht erodierte Top der USM wurde mithilfe Bohrdaten, seismischer Interpretationen, geologischen Karten und Profilen modelliert.

Der Top-USM-Horizont wurde in den Teilmodellen Bern und Landesgeologie auf der Seismik interpretiert. Im westlichen Molassebecken wurde die USM teilweise erodiert und die Felsoberfläche entspricht dort, wo die USM aufgeschlossen ist dem modellierten, erodierten Top-USM-Horizont (Fig. 2-4).

### **Top Obere Meeresmolasse (TOMM)**

Dort, wo die Obere Meeresmolasse (OMM) aufgeschlossen ist (Fig. 2-4), entspricht die Felsoberfläche dem modellierten, erodierten Top-OMM-Horizont. Am Südrand des Molassebeckens entspricht der Top-OMM-Horizont dem terrestrischen Äquivalent der OMM (=USM-III und Teile der OSM-I (BERGER et al. 2010)), da auf eine lithofazielle 3D-Modellierung der Einheiten und somit der Molasse-schüttungen verzichtet wurde. Der Top-OMM-Horizont wurde mithilfe Bohrdaten, seismischer Interpretationen, geologischen Karten und Profilen modelliert. Im östlichen Modelliergebiet wurde in der Seismik ein kontinuierlicher Doppelreflektor als Top OMM kartiert.

### **Top Obere Süßwassermolasse (TOSM)**

Wo die Obere Süßwassermolasse (OSM) erhalten ist (Fig. 2-4), entspricht die Felsoberfläche dem modellierten, erodierten Top-OSM-Horizont.

### **Felsoberfläche (TFels)**

Der oberste im Projekt GeoMol durchgehend modellierte Horizont ist die Felsoberfläche. Sie entspricht der Basis der quartären Lockergesteine und bei aufgeschlossenem Festgestein der Topographie. Grundlagedaten für die Modellierung der Felsoberfläche sind Bohrdaten, Isohypsenkarten, Felsmodelle und geologische Karten.

## 4. Datengrundlage

Für das Projekt GeoMol wurden alle Grundlagedaten im Koordinatensystem CH1903+(LV95) erfasst. Für bestehende Originaldaten im Koordinatensystem CH1903 (LV03), wurde eine vereinfachte Koordinatentransformation (E + 2 000 000, N + 1 000 000) vorgenommen (SWISSTOPO 2006).

In der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit mit den internationalen Partnern des GeoMol-EU-Projekts waren für den Datenaustausch und die Modellierung Koordinatentransformationen zwischen den verschiedenen landesüblichen Koordinatensystemen notwendig. Die Koordinatentransformation erfolgte entweder in ArcGIS (Methode «Projizieren») oder mittels der Software KoordTrans (KARICH 2010), mit der GoCAD-Objekte transformiert werden können (GEO MOL TEAM 2015).

### 4.1 Datenübersichtskarten

Für jeden modellierten Horizont von GeoMol17 wurde eine Zusammenstellung der verfügbaren Grundlagedaten in Form einer Datenübersichtskarte erstellt. Diese zeigt generell, wo welche Datentypen vorhanden sind. Das Konzept beruht darauf, für jeden Horizont die verfügbare Datengrundlage zu zeigen und all jene Datentypen (geologische Profile, seismische Sektionen, Bohrungen) darzustellen, für die eine Interpretation dieses Horizonts vorliegt (Fig. 4-1). Da die Datenübersichtskarten zeigen, wo und auf welche Daten sich die Modellierung der Horizonte stützt, können sie dem Nutzer einerseits zur Nachvollziehbarkeit der Modellierung von GeoMol17 dienen. Damit ist es möglich, die Verlässlichkeit von GeoMol17 zu zeigen, ohne auf ein Unsicherheitsmodell (s. a. Kap. 7.2) zurückgreifen zu müssen. Andererseits erlaubt es diese Darstellung auch, eine Überprüfung der Übereinstimmung der verfügbaren Daten vorzunehmen. Gleichzeitig werden Datenlücken erkannt, in denen die modellierten Horizonte auf Extrapolationen der Grundlagedaten beruhen.

Es wurde bewusst darauf verzichtet, interpolierte Darstellungen der Datendichte zu zeigen, da diese die vorhandenen Daten verschleiern und damit keine Aussage mehr über die vorhandenen Grundlagedaten zulassen.

Auf eine ähnliche Darstellung für GeoMol15 wurde in diesem Bericht verzichtet, da diese Daten bereits auf der Webseite des GeoMol-EU-Projekts aufgeschaltet sind (s. a. Kap. 9).

Figur 4-1 zeigt die Datenübersichtskarte des Horizonts Top Dogger. Darin sind die verfügbaren geologischen Profile (Kap. 4.3), Bohrdaten (Kap. 4.4) und seismischen Daten (Kap. 4.5 u. Kap. 4.6) dargestellt. Es wird zusätzlich angege-

ben, ob diese Daten eine Interpretation zum betreffenden Horizont beinhalten. Die Datenübersichtskarten aller modellierten Horizonte befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger.

### 4.2 Geologische und tektonische Karten

#### 4.2.1 Übersicht über die verfügbaren Daten

Zur Geologie und Tektonik des Molassebeckens liegt eine Vielzahl von Karten in verschiedenen Massstäben und unterschiedlichen Qualitäten vor. Als Hauptquelle für die Modellierung dienten die Karten des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25 000 (GA25) mit Erläuterungen sowie der GeoCover-Datensatz im gleichen Massstab. Die Karten des GA25 und der GeoCover-Datensatz haben unterschiedliche Entstehungsjahre und Autoren. Jedes Kartenblatt widerspiegelt somit den jeweils aktuellen Kenntnisstand der stratigraphischen und tektonischen Einheiten zu seinem Publikationszeitpunkt. Dies bedeutet, dass im Verlaufe der Entstehung des GA25 (1930 bis heute) die lithologischen Grenzen und die lithostratigraphischen Einheiten der einzelnen Kartenblätter nicht einheitlich kartiert wurden und die Kartierungen zweier Nachbarkartenblätter an den Blatt-rändern nicht zwingendermassen zusammenpassen.

Die Kartendaten, welche für die Modellierung von GeoMol17 verwendet wurden, sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

#### 4.2.2 Datenaufbereitung

##### *Harmonisierte Molassekarte*

Da bei den GA25-Karten und GeoCover-Daten bis Projektbeginn von GeoMol noch keine geometrische Blatt-randharmonisierung vorgenommen worden war und auch die lithostratigraphischen Einteilungen über die Entstehungsjahre nicht immer gleich gehandhabt wurden, wurde für das 3D-Modell eine harmonisierte Molassekarte erstellt (Fig. 2-4).

Für diese Kompilation und Harmonisierung dienten vor allem die tektonischen Nebenkarten des GA25 im Massstab 1:200 000 als Grundlagedaten. Da sich benachbarte Karten teilweise überlagern, wurden grundsätzlich die neueren Karten für den Verlauf der geologischen Konturen verwendet. Zusätzlich flossen in Gebieten, wo der GA25 und somit die zugehörige tektonische Nebenkarte noch nicht existiert, die Geologische Karte 1:500 000 (GK500) und die Geologische Spezialkarte «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» 1:100 000 (GSK128) in die

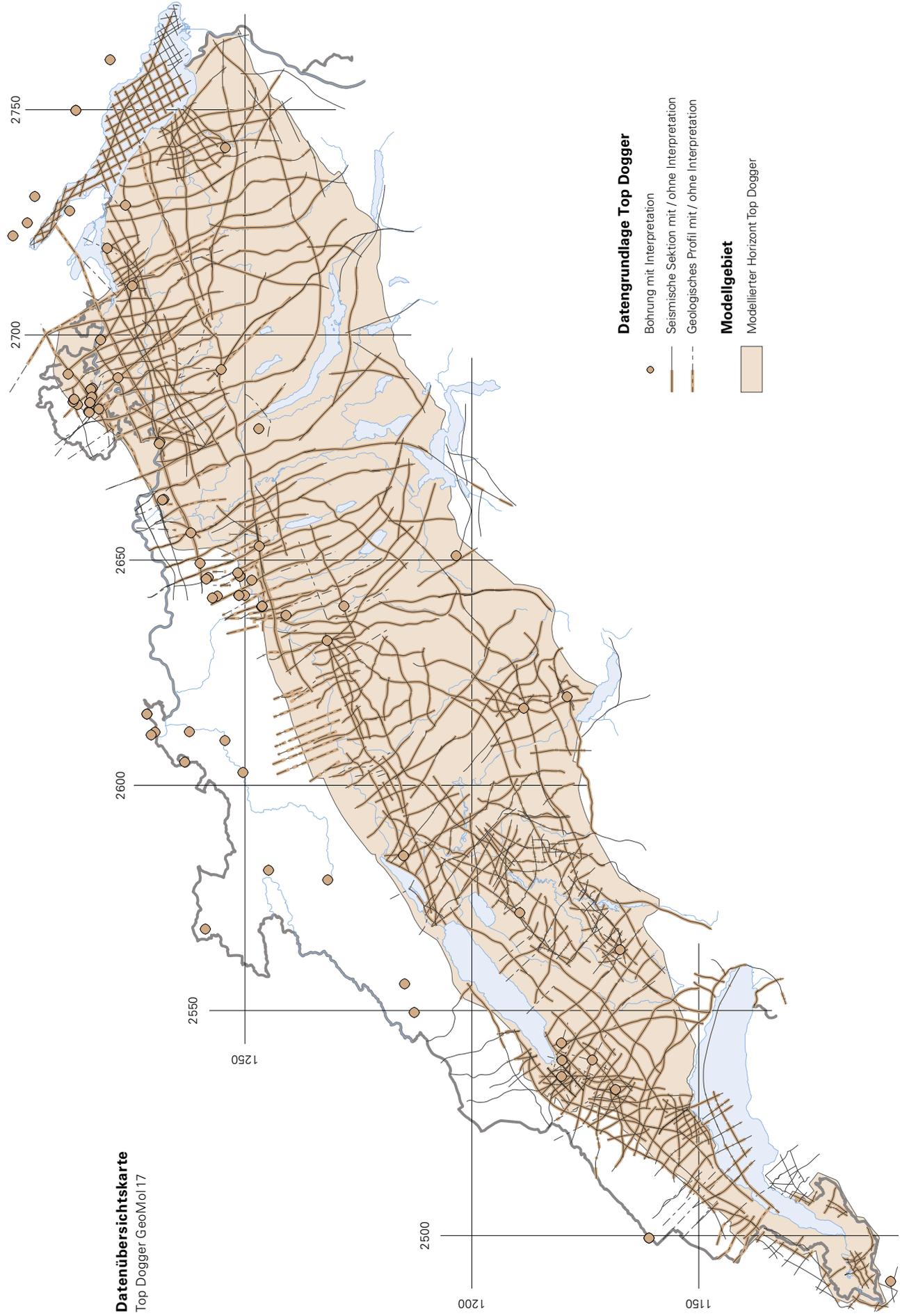


Fig. 4-1: Datenübersichtskarte des Top-Dogger-Horizonts mit Angabe der vorhandenen Daten- und Interpretationsgrundlagen.

Tab. 4-1: Kartendatengrundlage für die Modellierung von GeoMol17.

Kartendaten	Datengrundlage für:
Geologischer Atlas der Schweiz 1:25000 (GA25), inkl. Struktur- und Übersichtskarten aus Erläuterungen, und GeoCover-Datensatz	Harmonisierte Molassekarte, Harmonisierte Strukturkarte, Felsoberfläche, GeoMol 17
Tektonische Nebenkarten zum Geologischen Atlas 1:200000	Harmonisierte Molassekarte, Harmonisierte Strukturkarte
Geologische und Tektonische Karte 1:500000 (GK500)	Harmonisierte Molassekarte, Harmonisierte Strukturkarte, GeoMol 17
Geologische bzw. tektonische Karten und Skizzen in unterschiedlichen Massstäben (HAUS 1937, BECK 1945, RUTSCH 1947, SCHUPPLI 1950, BLAU 1966, RIGASSI 1978, SCHLUNEGGER et al. 1993, SCHLUNEGGER 1995, MÜLLER et al. 2002, BONNET 2007, MATZENAUER 2007, 2011, LAUBSCHER 2008, MEIER 2010, MOSAR et al. 2010, ROTH et al. 2010, IBELE 2011, SOMMARUGA et al. 2012, DUPUY et al. 2014, MADRITSCH 2015, RIME 2015, VOUILLAMOZ 2015, HEUBERGER et al. 2016)	Harmonisierte Strukturkarte, Teilmodell Waadt, Teilmodell Freiburg, Teilmodell Bern, Teilmodell Landesgeologie
Geologische Spezialkarte «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» 1:100000 (GSK 128) inkl. Erläuterungen (PFIFFNER et al. 2010, PFIFFNER 2011)	Triangelzone, Teilmodell Bodensee
Carte géol. France (1:50000), feuille Saint-Julien-en-Genevois incl. notice expl. (DONZEAU et al. 1997a, 1997b) et feuille Annemasse, incl. notice expl. (KERRIEN et al. 1998, CHAROLLAIS et al. 1998)	Teilmodell Genf
Synoptische tektonische Karte Top Kristallin, Beilage 6-17 (NAEF & MADRITSCH 2014)	Permokarbondrog
Geologische Übersichtskarte Baden-Württemberg, Deutschland 1:300000 (GÜK300) (als Download im Kartenviewer des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau LGRB)	Teilmodell Bodensee

Bearbeitung mit ein. Die Konturen wurden nach der Kompilation mit dem GA25 und dem GeoCover-Datensatz kontrolliert. So konnte sichergestellt werden, dass die Molasseaufschlüsse in der harmonisierten Karte richtig kartiert sind.

Während der Ablagerung der Oberen Meeresmolasse (OMM) kam es zeitgleich mit der Ablagerung der marinen Sedimente in den Schüttungsfächern der grossen Alpenflüsse (z.B. Napf-Schüttung, Hörnli-Schüttung, Kronberg-Gäbris-Schüttung, Pfänder-Schüttung) zur Ablagerung von fluviatilen Sedimenten. Dieses terrestrische Äquivalent der OMM (= USM-III und Teile der OSM-I (BERGER et al. 2010)) ist in der harmonisierten Molassekarte (Fig. 2-4) als OMM kartiert. So wurde beispielsweise bei der Hörnli-Schüttung zwischen Eschenbach SG und Herisau das terrestrische Äquivalent mit der OMM zusammen modelliert. In GeoMol wurde der Komplexität wegen auf eine lithofazielle 3D-Modellierung verzichtet, weswegen die Molassehorizonte (TUSM, TOMM und TOSM) vor allem am Südrand des Molassebeckens im chronostratigraphischen Sinn kartiert und modelliert wurden. Definitionen zu den aktuellen Molasse-Einheiten sind im Lithostratigraphischen Lexikon der Schweiz (www.strati.ch) zu finden.

Die geologischen Konturen der Molassesedimente wurden aus der harmonisierten Molassekarte abgeleitet, und Ausbisslinien von TUSM und TOMM flossen in die Modellierung der beiden Molassehorizonte mit ein. Ebenfalls abgeleitet aus dieser harmonisierten Karte ist die Ausbisslinie Basis «Känozoikum» im Norden des Molassebeckens, welche in die Modellierung des gleichnamigen Horizonts mit einfluss.

### Harmonisierte Strukturkarte

Die Kartenkompilationen der Faltenachsen (Fig. 2-4) und der Störungszonen im Molassebecken sind Erweiterungen der harmonisierten Molassekarte. Zusätzlich flossen dazu mehrere geologische und tektonische Karten aus verschiedenen Publikationen (s. a. Tab. 4-1) in die Kompilation mit ein. Die Strukturen wurden zusätzlich durch andere Oberflächendaten von SWISSTOPO ergänzt (digitales Höhenmodell der Schweiz swissALTI<sup>3D</sup> und Orthophotos).

Die harmonisierte Strukturkarte mit Indikation der Lage von Faltenachsen und Störungszonen an der Geländeoberfläche wurde schliesslich als Grundlagekarte für die Modellierung von GeoMol17 gebraucht.

## 4.3 Geologische Profile

### 4.3.1 Übersicht der verfügbaren Daten

Den meisten Erläuterungen des GA25 sind Tafeln mit geologischen Profilen durch das kartierte Gebiet beigelegt. Die geologischen Profile wurden vor allem für die Anbindung der Horizonte an die Ausbisslinien am Nordrand des Molassebeckens und für die Modellierung der Molassehorizonte verwendet. Zusätzlich zu den GA25-Profilen flossen geologische Profile von folgenden Publikationen in die Modellierung von GeoMol17 mit ein:

- Geologische Profile der Geologischen Spezialkarte «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» 1:100000 (GSK 128) für die Modellierung der Triangelzone,

- Geologische Profile von LAUBSCHER (2008) für die Modellierung des Teilmodells Bern,
- Geologische Profile von PIETSCH & JORDAN (2014) für die Modellierung des Teilmodells Landesgeologie,
- Geologische Profile basierend auf seismischen Sektionen der Nagra aus der Etappe 2 des Sachplans Geologische Tiefenlager (MEIER et al. 2014) für die Modellierung des Teilmodells Landesgeologie.

#### 4.3.2 Datenaufbereitung

Die Profilsuren von geologischen Profilen wurden für das Projekt GeoMol in ArcGIS georeferenziert, die zu modellierenden Horizonte in Move™ digitalisiert und somit tiefenreferenziert. Die so bearbeiteten Profile wurden mit dem digitalen Höhenmodell swissALTI<sup>3D</sup> (SWISSTOPO 2017) verglichen und gegebenenfalls hinsichtlich ihrer räumlichen Lage korrigiert. Einzelne sich kreuzende und auf seismischen Sektionen basierende geologische Profile stimmten an der Kreuzung nicht überein. In diesen Fällen wurde angenommen, dass die Fehler auf einer unterschiedlichen Zeit-Tiefen-Konversion oder auf unterschiedlicher Qualität der zu Grunde liegenden seismischen Sektionen beruhen. Die geologischen Profile wurden vor allem am nördlichen Beckenrand für die Anbindung der modellierten Horizonte an die Ausbisslinien genutzt. Auch für die Modellierung der beiden Molassehorizonte TUSM und TOMM waren die geologischen Profile eine wichtige Grundlage.

Andernorts dienten die geologischen Profile meist als konzeptionelle Grundlage mit Informationen zu Schichtmächtigkeiten und Lage von Störungen und Faltenstrukturen. Die geologischen Profile stellen somit eine wichtige Grundlage für die Überprüfung der Modellierung dar und sind oftmals die einzige Datengrundlage in Gebieten mit einer ansonsten schlechten Datenabdeckung.

#### 4.4 Bohrdaten

Bohrdaten stellen eine zuverlässige Quelle für Informationen im Untergrund dar. Punktuell erhält man einen sehr präzisen Einblick in den Untergrund, wobei die Bestimmung der Lithofazies und der lithostratigraphischen Grenzen stark vom Wissen und der Erfahrung des Geologen abhängt. Es gibt jedoch bei der Bearbeitung im Vergleich zu anderen Erkundungsmethoden in der Regel weniger Freiraum für Interpretationen.

##### 4.4.1 Übersicht der verfügbaren Daten

Für das Projekt GeoMol standen Bohrdaten von unterschiedlicher Tiefe, unterschiedlichen Bohrzwecken und verschiedenen Datenlieferanten zur Verfügung. Zwecks harmonisierter Speicherung wurden folgende Bohrdaten in eine Datenbank integriert:

- Bohrungen GA25: Ungefähr 13 500 Bohrungen konnten aus den Kartenblättern des GA25 übernommen werden.

Diese Bohrdaten enthalten Informationen über die erreichte Felskote und der dabei angetroffenen Felslithologie. Zusätzlich wurden etwa 600 Bohrungen aus den Erläuterungen des GA25, welche nicht auf den Karten abgebildet sind, hinzugefügt.

- Tiefbohrungen aus den Archivbeständen der Landesgeologie: Aus dem Archiv der Landesgeologie konnten gut 1 500 Bohrungen aus diversen Untersuchungen und geologischen Berichten übernommen werden.
- Bohrdaten aus Aufzeitbohrungen<sup>1</sup> der Aktiengesellschaft für Schweizerisches Erdöl (SEAG) und der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Rund 700 dieser Bohrungen haben den Fels erreicht, bei 220 Bohrungen wurde der Fels nicht erreicht oder dessen Erreichen ist nicht eindeutig.
- Kantonale Bohrdaten: Die meisten Bohrungen (vor allem Erdwärmesonden und Bohrungen aus geotechnischen Untersuchungen) wurden von den Kantonen zur Verfügung gestellt. Die kantonalen Datenbestände sind sehr unterschiedlich organisiert und reichen von reinen Papierarchiven bis hin zu Datenbanken mit verlinkten PDF-Dateien der Bohrungen. Je nach Art des Archivs oder der Datenbank konnten die relevanten Informationen direkt in die GeoMol-Projekt-Datenbank importiert werden oder mussten für das Projekt GeoMol eingescannt (Bohrprofile) und/oder tabellarisch erfasst werden (Schichtgrenzen).
- Zusätzlich zu den oben genannten Datensätzen wurden Bohrungen der SBB, der armasuisse und des Bundesamts für Strassen (ASTRA) gesammelt und erfasst.

Zusätzlich zu den Datenübersichtskarten, welche pro Horizont die verwendeten Bohrdaten mit/ohne Interpretation darstellen, befindet sich auf dem beiliegenden Datenträger ebenfalls eine Tabelle der Tiefbohrungen, welche für GeoMol17 verwendet wurden.

##### 4.4.2 Datenaufbereitung

Auf Papier vorliegende Bohrprofile wurden eingescannt und in der Bohrdatenbank harmonisiert eingelesen. Dabei wurden die für GeoMol17 relevanten Horizonte erfasst, sowie zusätzliche lithostratigraphische Horizonte, welche in den Pilotregionen modelliert wurden (Kap. 3).

Für die Bohrungen wurde eine Qualitätsklassifikation angewendet und in der Datenbank gespeichert (s. a. Kap. 7.1.2.2).

Teilweise lag für eine Bohrung mehr als eine Interpretation der stratigraphischen Einheiten vor. In diesen Fällen wurde entweder einer der Interpretationen der Vorrang gegeben, eine Neuinterpretation vorgenommen oder die Bohrung wurde nicht weiterverwendet.

<sup>1</sup> Aufzeitbohrungen werden im Rahmen von seismischen Kampagnen abgeteufelt. Mittels Geophonen im Bohrloch werden die seismischen Geschwindigkeiten im Lockergestein eruiert. Das «langsame» Lockergestein kann das seismische Abbild des tieferen Untergrunds verzerrten und muss deshalb bei der Prozessierung der seismischen Daten mitberücksichtigt werden.

## Seismische Sektionen

GeoMol 17

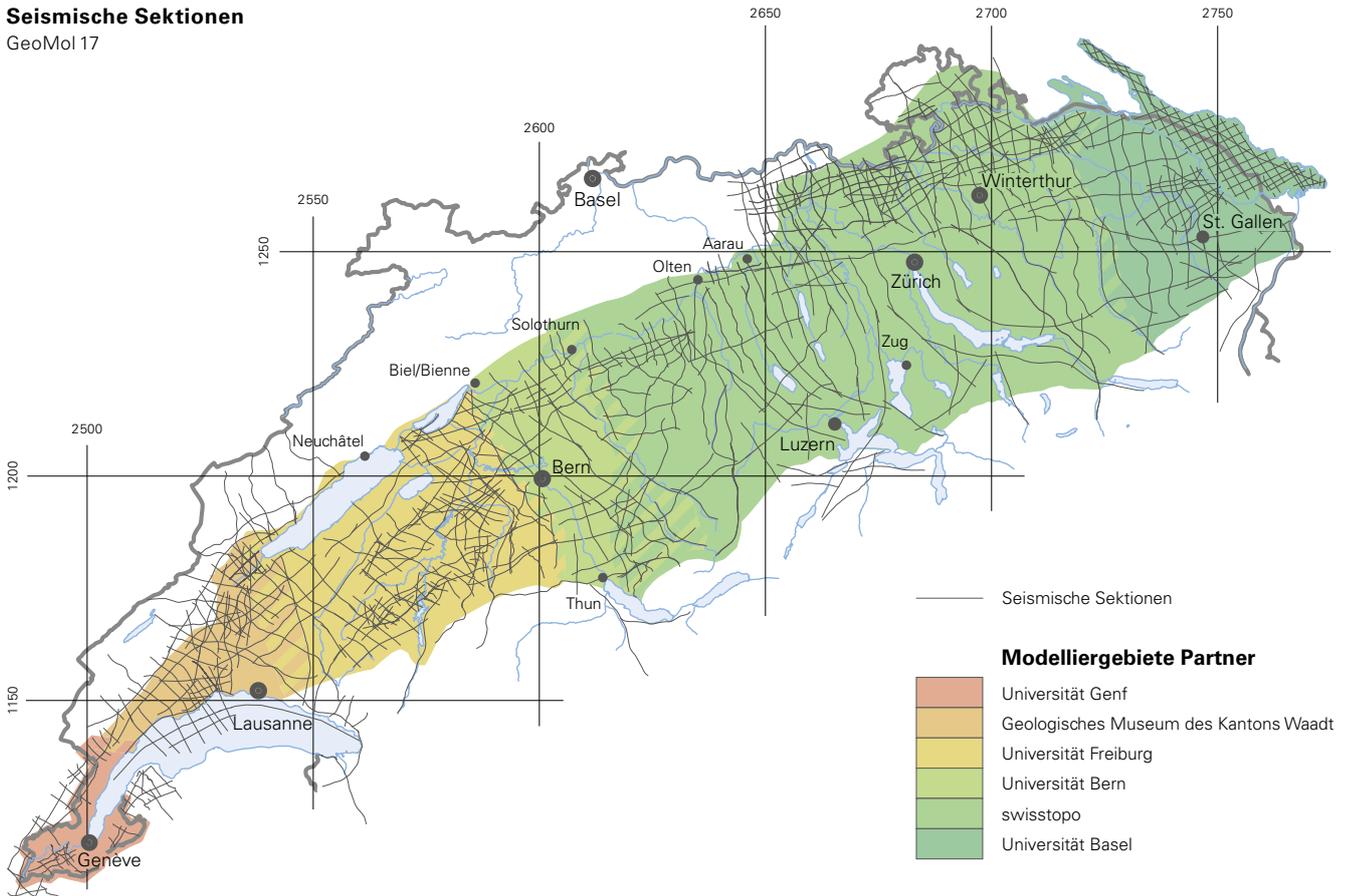


Fig. 4-2: Übersicht der für GeoMol Schweiz zur Verfügung gestellten seismischen 2D-Sektionen.

### 4.5 Seismische Sektionen

Der Grossteil der verwendeten 2D-Seismik stammt aus der Kohlenwasserstoff-Exploration der 1960er bis 1990er Jahre. Zusätzlich wurden seismische Sektionen aus den Jahren 2010 und 2014 für das Teilmodell Genf interpretiert. Eine Ausnahme bilden die seismischen Sektionen im östlichen Juragebirge und angrenzenden Molassebecken, welche 2011/2012 von der Nagra im Rahmen der Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (NAGRA 2014) aufgenommen wurden. Für das Projekt GeoMol wurden diese Sektionen und deren Interpretationen bereits tiefenkonvertiert zur Verfügung gestellt. So konnten die interpretierten Sektionen wie geologische Profile verwendet werden (s. a. Kap. 4.3.1).

Viele der im Schweizer Mittelland aufgenommenen seismischen Sektionen haben über die Jahre hinweg die Besitzer gewechselt und wurden bisweilen auch reprozessiert. Oftmals ist unklar, welche Prozessierungsschritte den für das GeoMol-Projekt verwendeten, im SEG-Y-Format abgespeicherten Daten zugrunde liegen. Zusätzlich ist es oft auch unklar, ob Papiersektionen und eine gleichnamige SEG-Y-Datei<sup>2</sup> den gleichen Prozessierungsgrad aufweisen. Parallel zu den Besitzerwechseln und verschiedenen Nut-

<sup>2</sup> Standardformat für die Speicherung von digitalen geophysikalischen Daten. Das Format wurde durch die Society of Exploration Geophysicists (SEG) entwickelt.

zungen kam es im Laufe der Zeit zum Teil auch zu Umbenennungen der seismischen Sektionen.

#### 4.5.1 Übersicht der verfügbaren Daten

Figur 4-2 zeigt eine Übersicht über die seismischen Sektionen, welche dem Projekt zu Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich dazu befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger die Datenübersichtskarten mit Lage der seismischen Sektionen und der Angabe der Interpretationen pro Horizont (s. a. Kap. 4.1). Ausserdem ist darauf eine Tabelle mit den seismischen Sektionen, welche für GeoMol17 verwendet wurden, gespeichert.

#### 4.5.2 Datenaufbereitung

Die meisten der verwendeten seismischen Sektionen konnten von den Datenlieferanten direkt im SEG-Y-Format übernommen werden. Einige ältere Sektionen waren jedoch nur als Scans von Papiersektionen vorhanden und mussten zuerst vektorisiert werden. Die Vektorisierung der seismischen Sektionen zu SEG-Y-Dateien und die Zuweisung der dazugehörigen Liniengeometrien wurde von einer spezialisierten Firma durchgeführt. In diesem Schritt wurden die seismischen Daten neben der Vektorisierung zum Teil auch weiterverarbeitet, indem das Signal/Rausch-Verhältnis optimiert wurde oder gestapelte Sektionen migriert wurden.

Bereits vorhandene SEGYY-Dateien waren teilweise ohne Liniengeometrie versehen. Weiter war es teilweise unklar, ob es sich bei den Koordinatenangaben um Anregungspunkte (SP), Common Mid Points (CMP), Common Depth Points (CDP) oder Empfangspunkte (GRP) handelt. Um Klarheit bezüglich der Art der Koordinaten zu verschaffen, wurde eine Basiskarte mit den vorhandenen Koordinaten und Geometrien der seismischen Linien erstellt und über eine topographische Karte gelegt. Mit dieser Darstellung konnten anhand der Anordnung der Koordinaten die SP, CDP oder GRP identifiziert und eine Plausibilisierung der Koordinaten durchgeführt werden. (Bei den meisten seismischen Aufnahmen wurden Vibrationsfahrzeuge als Hauptenergiequelle eingesetzt. In diesen Fällen folgen die Anregungspunkte meist Strassen oder Wegen).

Nach der Koordinatentransformation zu CH1903+ (LV95) wurden die SEGYY-Dateien in ein Dateninterpretationssystem geladen und die in ROTH et al. (2010) und MEIER (2010) aufgeführten Gesamtshifts angewendet, um die Misties an den Sektionskreuzungen zu reduzieren (s. a. Kap. 5.3.3). Da die Interpretationen der seismischen Daten der Nagra aus der Etappe 1 des Sachplans geologische Tiefenlager (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) als Grundlage für GeoMol17 dienen, wurde auch die seismische Referenzebene von 500 m ü. M. verwendet.

#### 4.5.3 Bodenseekampagne

swisstopo veranlasste die Vektorisierung der vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) zur Verfügung gestellten Scans der Papiersektionen der Bodenseekampagne. Diese Kampagne wurde im Winter 1980/1981 durch die Prakla-Seismos im Auftrag der damaligen BEB Gewerkschaften Brigitta und Elwerath Betriebsführungsgesellschaft mbH, der Deutschen BP AG, der Deutschen Schachtbau- und Tiefbohrergesellschaft mbH, der Preussag AG, der SEAG, der Vorarlberger Erdöl und Ferngas GmbH und der Wintershall AG durchgeführt (SCHULZ et al. 1982). Insgesamt handelt es sich dabei um 49 seismische Sektionen in jeweils drei Versionen:

- Gestapelt ohne Korrektur
- Gestapelt mit statischer Korrektur und ohne Kohärenzfilterung
- Gestapelt mit statischer Korrektur und mit Kohärenzfilterung

Für das GeoMol-EU-Projekt war es wichtig, über eine gute Datengrundlage zu verfügen, um die Modelle aus Deutschland, Österreich und der Schweiz in der Bodenseeregion verbinden zu können.

Die Qualität der Bodenseeseismik ist sehr unterschiedlich. Ein Grund dafür dürften die zum Teil beträchtlichen Mächtigkeiten an schlecht sortierten quartären Sedimenten sein, die dem Rheindelta vorgelagert sind (SCHULZ et al. 1982, SCHOOP & WEGENER 1984). In der Umgebung des Deltas sind kaum Reflektoren auszumachen. Erkennbar sind lediglich unerwünschte Signaleinsätze (Multiple), welche durch Reflexionen zwischen Schichtgrenzen, oder in diesem Fall zwischen Seeboden und der Wasseroberfläche, zu-

stande kommen und die erwünschten Signale überlagern. Weiter weg vom Delta verzerren mächtige quartäre Ablagerungen mit niedrigen seismischen Geschwindigkeiten das seismische Abbild. So wölben sich unterhalb einer Rinne im Seeboden die mesozoischen Reflektoren parallel zur Rinne nach unten. In den statisch korrigierten Versionen sind die mesozoischen Reflektoren mehr oder weniger flach, dafür wölbt sich die Rinnenfüllung nach oben und hinterlässt fälschlicherweise den Eindruck eines Reliefs. Eine weitere Schwierigkeit ist die Anbindung der Bodenseeseismik an die Landseismik in der Schweiz. Wie bei der Landseismik wurden auch die seismischen Sektionen der Bodenseeseismik in der Zeitachse verschoben, um Versätze an den Sektionskreuzungen zu reduzieren. Die Bodenseekampagne wurde am Nordwestufer in der Nähe von Kreuzlingen an die Landseismik eingehängt. Danach zeigte sich aber, dass Reflektoren auf der Bodenseeseismik gegen Südost zunehmend höher liegen als die Pendants auf der Landseismik. Der Grund für diese Diskrepanz konnte nicht restlos geklärt werden, dürfte aber mit den statischen Korrekturen zusammenhängen, welche in der Bodenseeseismik zur Kompensation der niedrigen Geschwindigkeiten in der Wassersäule und im quartären Lockergestein angewandt wurden.

## 4.6 Seismische Interpretationen

Für GeoMol15 wurde auf die Interpretationen der Transekte aus SOMMARUGA et al. (2012) zurückgegriffen. Als Grundlage für deren Interpretationen dienten seismische Sektionen aus der Kohlenwasserstoffexploration (s. a. Kap. 4.5). Im Rahmen von GeoMol17 konnte die Dichte der verwendeten seismischen Sektionen im Vergleich zu GeoMol15 erhöht werden. Neu hinzu kamen die bereits tiefenkonvertierten Sektionen der Nagra aus der Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT), des Bodensees, sowie einzelne Sektionen in den Voralpen und im Mittelland. Mit der Neuinterpretation von einzelnen seismischen Sektionen konnte der Kenntnisstand der entsprechenden regionalen Geologie teilweise erhöht werden. So war es beispielsweise im Falle der Bodenseeseismik trotz der in Kapitel 4.5.3 erwähnten Schwierigkeiten möglich, die mesozoischen Markerhorizonte sowie einige Störungen zu kartieren. Eine Übersicht über die in GeoMol in den seismischen Daten interpretierten Horizonte findet sich in Tabelle 4-2.

### 4.6.1 Übersicht der verfügbaren Daten

Im Verlauf der Arbeiten an GeoMol konnte das Projektteam auf die bedeutendsten publizierten und beckenweit interpretierten seismischen Sektionen im Schweizer Mittelland (NAEF et al. 1995, ROTH et al. 2010, MEIER 2010, SOMMARUGA et al. 2012, MADRITSCH et al. 2013) zurückgreifen. Die Interpretation der Horizonte (Tab. 4-2) ist in allen Interpretationen über weite Strecken sehr ähnlich oder liegt wenige Reflektoren auseinander. Weil die Interpretation an Bohrungen geeicht wurde und parallel zu den Reflektoren verläuft, gibt es kaum Abweichungen in den Geometrien der

interpretierten Horizonte. Beim Vergleich der Interpretationen fällt vor allem die unterschiedliche Interpretation der Störungen auf. Diese werden in der Regel dort interpretiert, wo kontinuierliche Reflektorenpakete lateral enden und unterbrochen oder vertikal versetzt sind. Ob und inwiefern diese Unterbrüche durch Störungen verursacht sind, ist nicht immer klar. Unterbrüche der Reflektoren können auch durch geringe Datenqualität verursacht oder durch die Prozessierung hervorgehoben werden.

Die Interpretation von benachbarten Linien und somit das Erstellen einer regionalen Übersicht gibt weitere Hinweise über die Existenz und den möglichen Verlauf eines Störungssystems. Subjektive Erfahrungen der Interpreten und konzeptionelle tektonische Modelle sind in den Störungsinterpretationen oft wiedererkennbar (s. a. Kap. 7.2.2). GeoMol15 basiert auf der Interpretation von SOMMARUGA et al. (2012), für GeoMol17 wurden die Interpretationen von ROTH et al. (2010) und MEIER (2010) als Basis verwendet. Von der Bodenseeseismik lag keine digitale Interpretation vor.

Zusätzlich zu den Datenübersichtskarten, welche pro Horizont die seismischen Sektionen mit und ohne Interpretation darstellen, befindet sich auf dem beiliegenden Datenträger eine Tabelle mit den seismischen Sektionen, welche für GeoMol17 verwendet wurden.

#### 4.6.2 Datenaufbereitung

Aus technischen Gründen konnten mit der Interpretationssoftware Seisvision lediglich die Nagra-Interpretationen (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) direkt geladen und weiterverwendet beziehungsweise als Ursprung für zusätzlich geladene, uninterpretierte Sektionen verwendet werden. Mit der Interpretationssoftware Kingdom Suite konnten zudem auch die Interpretationen von SOMMARUGA et al. 2012 geladen werden, da diese Software die Möglichkeit bietet, Horizonttraster in Zeit zu importieren und Horizontinterpretationen aus den Schnitten zwischen geologischen Oberflächen und Liniengeometrien zu extrahieren. Die beim Laden einer seismischen Sektion notwendigen Schritte zur Qualitätssicherung und Bearbeitung wurden in Kapitel 4.5.2 beschrieben.

#### 4.6.3 Neue Interpretationen

Im Rahmen von GeoMol17 dienten die Interpretationen der Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) und des seismischen Atlas des Schweizer Molassebeckens (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012) als Grundlage für die meisten Teilmodelle (Fig. 4-2), wurden aber teilweise ergänzt oder neu interpretiert, um eine einheitliche Datengrundlage zu erreichen.

Tab. 4-2: Interpretierte Horizonte in den seismischen Daten und Bezeichnung der seismischen Markerhorizonte im Projekt GeoMol im Vergleich zu vorhergehenden Arbeiten im Schweizer Molassebecken.

Projekt GeoMol		Nagra	NTB 94-14 NAEF et al. (1995)	NAB 10-39 ROTH et al. (2010)	NAB 10-40 MEIER et al. (2010)	NAB 13-10 MADRITSCH et al. (2013)	SASMB SOMMARUGA et al. (2012)	
Top OMM	TOMM	Basis OSM	BOS	BOS				
Top USM	TUSM	Basis OMM	BOM	BOM				
Top UMM	TUMM							
Basis «Känozoikum»	BKän	Basis Tertiär / Top Malm	BTe	BTe	BTe	BTe	Near Base Tertiary	NBTe
Top oberer Malm	TUMa						Near Top late Malm	NTIMa
		Basis «Kimmeridgien»	BKi					
Top unterer Malm	TLMa						Intra Early Malm	leMa
Top Dogger	TDo	Basis Malm / Top Dogger	BMa	BMa	BMa	BMa	Near Top Dogger	NTDo
		«Unterer Dogger»	UDo					
		Top Opalinus-Ton	TOp					
Top Lias	TLi	Top Lias/Basis Opalinus-Ton	TLi	TLi	TLi	TLi	Near Top Liassic	NTLi
Top Keuper	TKeu						Near Top Triassic	NTTr
Top Muschelkalk	TMus	Basis Keuper / Top Muschelkalk	TMk	TMk	TMk	TMk	Near Top Muschelkalk	NTMuka
Basis «Mesozoikum»	BMes	Basis Mesozoikum	BMz	BMz	BMz	BMz	Near Base Mesozoic	NBMes

*Teilmodell Genf:* Alle für das Teilmodell verwendeten Sektionen wurden von Grund auf neu interpretiert.

*Teilmodell Waadt:* Alle für das Teilmodell verwendeten Sektionen wurden von Grund auf neu interpretiert. Vorhandene Interpretationen (MEIER 2010, SOMMARUGA et al. 2012) wurden in die Interpretationssoftware Kingdom Suite geladen und mit der neu erstellten Interpretation verglichen.

*Teilmodell Freiburg:* Das Modell basiert auf der Interpretation von SOMMARUGA et al. (2012). 59 uninterpretierte Sektionen im Modelliergebiet wurden benutzt, um die Interpretation von SOMMARUGA et al. (2012) auszubauen und die Datengrundlage vor allem im mittleren und östlichen Modelliergebiet zu verdichten.

*Teilmodell Bern:* Als Grundlage wurde die Interpretation der Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) verwendet. Zusätzliche, uninterpretierte Sektionen wurden in das vorhandene Interpretationsraster eingehängt und interpretiert. Dies vor allem im südlichen Teil des Modelliergebiets wo keine Nagra-Interpretationen vorhanden waren. Aufgrund der neuen Interpretationen musste die Interpretation der Nagra stellenweise abgeändert werden. Aus SOMMARUGA et al. (2012) wurden die Interpretationen der Transekte zu Vergleichszwecken in der Interpretationssoftware Kingdom Suite nachgezeichnet.

*Teilmodell Landesgeologie:* Ausgehend von der Interpretation der Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) wurden einzelne uninterpretierte Sektionen dem Datensatz hinzugefügt und die existierende Interpretation ergänzt oder abgeändert. Die Horizonte TLMa und TKeu wurden neu interpretiert. TOMM und TUSM wurden auf seismischen Sektionen entlang der Alpen ausgehend von geologischen Karten interpretiert.

*Teilmodell Bodensee:* Ausgehend von der Interpretation der Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) wurden neue Sektionen interpretiert und die existierende Interpretation ergänzt oder abgeändert. Die Bodenseeseismik wurde von Grund auf neu interpretiert (s. a. Kap. 4.5.3).

## 4.7 Felsoberflächenkarten und -modelle

### 4.7.1 Übersicht der verfügbaren Daten

Bestehende Daten wie Felsisohypsenkarten oder Felsoberflächenmodelle von Dritten wurden bei der Modellierung der Felsoberfläche von GeoMol17 direkt miteinbezogen und danach an die vorhandenen Bohrdaten angepasst. Die Felsoberfläche von GeoMol17 stellt somit eine Kompilation aus verschiedenen bereits bestehenden Felsoberflächenmodellen dar. Die dabei noch vorhandenen Lücken wurden bei der Modellierung interpoliert und manuell angepasst.

Zwischen den bestehenden Felsoberflächenkarten und -modellen in der Schweiz gibt es qualitative Unterschiede. So unterscheiden sie sich in der Dichte der verwendeten Daten, des verwendeten Massstabes, der Grösse des gewählten Untersuchungsperimeters und dem verwendeten Verfahren bei der Modellierung.

Die Felsoberflächenmodelle, welche für Modellierung der Felsoberfläche verwendet wurden sind in Figur 4-3 dar-

gestellt und in Tabelle 4-3 zusammengefasst. Zusätzlich zu den vier überregionalen Felsoberflächenmodellen (JORDAN 2007, 2010, FIORE 2007, SCHÄLLI 2012, DÜRST STUCKI & SCHLUNEGGER 2013, PIETSCH & JORDAN 2014) gibt es kantonale Modelle (Genf, Waadt, Solothurn), Felsisohypsenkarten des GA25 (Blätter Aarau, Baden, Balsthal, Murgenthal, Romanshorn, Schöftland, Uster, Winterthur, Zürich), regionale Felsisohypsenkarten aus der Nordschweiz (GRAF 2009) und auf Gravimetrie basierende Felsisohypsenkarten der grossen Alpentäler (KLINGELÉ 2012). Diese Felsoberflächenmodelle und Isohypsenkarten wurden in die Modellierung (Kap. 5.3.5.1) der Felsoberfläche von GeoMol17 miteinbezogen.

### *Modell Nagra Nordostschweiz*

Das Felsoberflächenmodell, welches für die Nagra (JORDAN 2007, 2010; PIETSCH & JORDAN 2014) erstellt wurde, deckt das gesamte Gebiet der Nordostschweiz ab. Die Felsoberfläche oder auch Basis «Quartär» wurde in ArcGIS basierend auf bestehenden Karten, Bohrdaten, Berichten und seismischen Untersuchungen von Hand digitalisiert und zu einem Raster mit einer Zellengrösse von 25 m interpoliert. Das Modell entstand 2008 als erste Version und ein grosser Teil davon wurde 2013 überarbeitet und an die neusten Daten und Untersuchungen angepasst.

### *Modell Dürst Stucki*

Das Felsoberflächenmodell von DÜRST STUCKI & SCHLUNEGGER (2013) deckt das Gebiet des gesamten Kantons Bern ab. Die Felsoberfläche wurde anhand von circa 40 000 Bohrungen durch eine Konstruktion von Hand in ArcGIS erstellt und zu einem Raster mit einer Zellengrösse von 25 m umgerechnet. Die verwendete Bohrdatenbank basiert auf einem Stand von 2013.

### *Modell Fiore*

Das Felsoberflächenmodell von FIORE (2007) kombiniert mehrere Isohypsenkarten, reflexionsseismische und geoelektrische Daten (PUGIN 1988, MEYER 2000, DUPUY 2005). Dieses Modell deckt grosse Teile der Westschweiz ab. Die Zellengrösse des Rasters beträgt 50 m.

### *Modell Schälli*

Das Felsoberflächenmodell von SCHÄLLI (2012) stellt die Felsoberfläche im Seeztal und dem unteren Rheintal mit einer Zellengrösse von 25 m dar. Auch dieses Modell beinhaltet einige bereits bestehende Karten zur Felsoberflächentopographie (WILDI 1984, GRÜNENFELDER 1989, MÜLLER 1995, PFIFFNER et al. 1997, OBERHAUSER 1998, BENZ 2003, KLINGELÉ 2009, BERNASCONI 2011). Die Modellierung dieses Modells erfolgte nach dem gleichen Vorgehen wie bei den Modellen Nagra Nordostschweiz und Dürst Stucki.

### *Felsisohypsenkarten Graf*

Die fünf regionalen Felsisohypsenkarten Thurtal-Rafzerfeld, Rafzerfeld-Rheintal, Birrfeld-Habsburg-Riniker-

## Datenübersichtskarte

Felsoberfläche

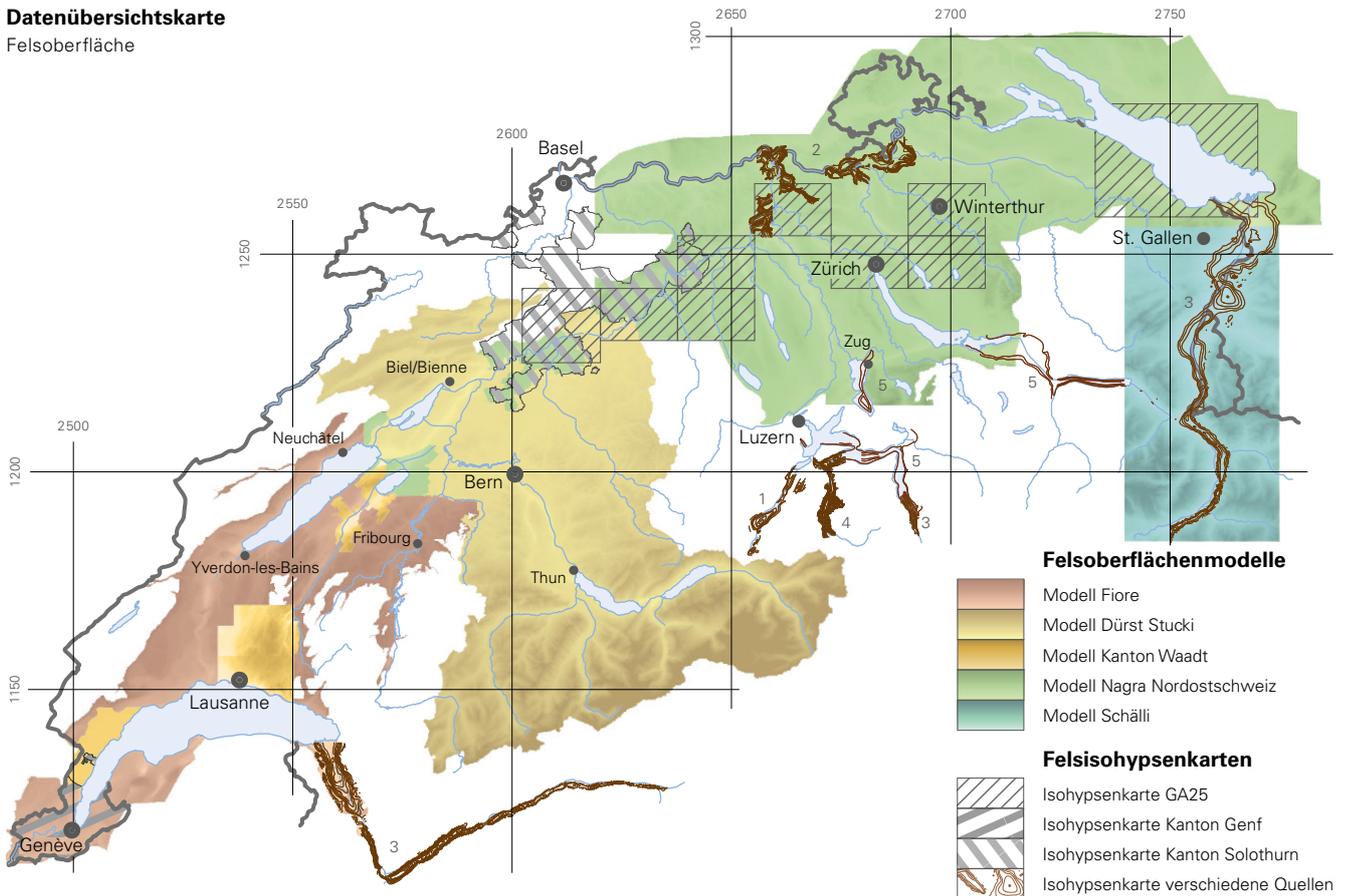


Fig. 4-3: Bestehende Felsoberflächenmodelle und Felsisohypsenkarten der Schweiz, welche für die Modellierung und Validierung des Felsoberflächenmodells von GeoMol17 verwendet wurden (s. a. Tab. 4-3). Die Felsisohypsenkarten aus verschiedenen Quellen sind nummeriert (1 BODMER et al. 1996, 2 GRAF 2009, 3 KLINGELÉ 2012, 4 LINIGER et al. 2014, 5 WILDI 1984).

feld, Ruckfeld-Surbtal und Aaremündung von GRAF (2009) weisen eine Äquidistanz von 10m auf. Als Grundlagen dienten Bohrungen, Aufschlüsse, Profile, bestehende Karten und Gutachten.

### **Felsisohypsenkarte Nagra Wellenberg**

Die Felsisohypsenkarte der Nagra (LINIGER et al. 2014) deckt das Gebiet um Buochs, Wolfenschiessen und Engelberg in Nidwalden ab. Als Grundlagedaten wurden Bohrungen, Felsisohypsen aus geologischen Untersuchungen zum Neubau der Steilrampe der Luzern-Stans-Engelberg-Bahn (Dr. T.R. Schneider AG) und Daten der Kohlenwasserstoffindustrie (BODMER et al. 1996) verwendet.

### **Felsisohypsenkarte Bodmer**

Im Rahmen der Suche nach tiefen Gasvorkommen hat das Tiefengas Konsortium (TGK) gravimetrische, reflexions- und refraktionsseismische Messungen in der Zentralschweiz durchgeführt. Basierend auf diesen Daten, weiteren Studien und Bohrungen erstellten BODMER et al. (1996) eine Felsisohypsenkarte in den Haupttälern von Obwalden, Nidwalden und Uri.

### **Felsisohypsenkarte Wildi**

In der Nord- und Ostschweiz hat WILDI (1984) eine Felsisohypsenkarte der Felsoberflächentopographie unter den quartären Talfüllungen erstellt. Diese Karte zeigt, dass viele Täler im Mittelland und den Alpen aufgrund von Glazialerosion stark übertieft sind.

### **Felsisohypsenkarte Klingelé**

Das Modell der Mächtigkeit der quartären Lockergesteine von KLINGELÉ (2012) basiert auf gravimetrischen Untersuchungen und deckt die grossen Alpentäler und den Jura ab. Der Dichtekontrast zwischen Lockergestein und dem älteren und tieferen Festgestein ermöglicht es, die Mächtigkeit der quartären Lockergesteine und somit die Lage der Felsoberfläche zu bestimmen.

Die Karte der Quartärmächtigkeit aus gravimetrischen Untersuchungen dient in den grossen Alpentälern als Grundlage für die Modellierung und war wichtig für eine erste annähernde Darstellung der Felsoberflächentopographie.

Tab. 4-3: Bestehende Felsoberflächenmodelle in der Schweiz, welche für die Modellierung der Felsoberfläche von GeoMol17 verwendet wurden.

<b>Modell</b>	<b>Publikation</b>	<b>Gebiet</b>	<b>Auflösung</b>	<b>Grundlagedaten</b>
Modell Nagra Nordostschweiz	JORDAN (2007, 2010), PIETSCH & JORDAN (2014)	Felsoberflächenmodell Nordostschweiz	Zellengrösse Raster: 25 m	Bestehende Karten, Bohrdaten, Berichte und seismische Untersuchungen
Modell Dürst Stucki	DÜRST STUCKI & SCHLUNEGGER (2013)	Felsoberflächenmodell Kanton Bern	Zellengrösse Raster: 25 m	Bohrdatenbank mit ca. 40 000 Bohrungen
Modell Fiore	FIORÉ (2007)	Felsoberflächenmodell gesamte Westschweiz	Zellengrösse Raster: 50 m	Isohypsenkarten, reflexionsseismische und geoelektrische Daten
Modell Schälli	SCHÄLLI (2012)	Felsoberflächenmodell Seetal und Rheintal	Zellengrösse Raster: 25 m	Bestehende Karten zur Felsoberflächen-topographie, Bohrdaten
Felsisohypsenkarte Graf	GRAF (2009)	Felsisohypsenkarten Thurtal – Rafzerfeld, Rafzerfeld – Rheintal, Birrfeld – Habsburg – Rimikerfeld, Ruckfeld – Surbtal und Aaremündung	Äquidistanz: 10 m	Bohrungen, Aufschlüsse, Profile, bestehende Karten, Gutachten
Felsisohypsenkarte Nagra Wellenberg	LINIGER et al. (2014)	Felsisohypsenkarten Buochs, Wolfenschiessen und Engelberg (NW)		Bohrungen, Felsisohypsen und Daten der Kohlenwasserstoffindustrie
Felsisohypsenkarte Bodmer	BODMER et al. (1996)	Felsoberflächenmodell der Haupttäler von Obwalden, Nidwalden und Uri		Gravimetrische, reflexions- und refraktionsseismische Messungen und weitere Studien und Bohrungen
Felsisohypsenkarte Wildi	WILDI (1984)	Felsisohypsenkarten in der Nord- und Ostschweiz (Täler und Seen)	Äquidistanz: 50 m	Bestehende Karten, Bohrdaten, seismische und gravimetrische Daten
Felsisohypsenkarte Klingelé	KLINGELÉ (2012)	Mächtigkeit der Quartären Lockergesteine der grossen Alpentäler und des Juras		Dichtekontrast zwischen Lockergestein und dem älteren und tieferen Festgestein
Kantonale Modelle (GE, VD, SO)		GE: Felsisohypsenkarte Kt. Genf; VD: Sieben regionale Felsoberflächenmodelle; SO: Felsisohypsenkarte, deckt Kantonsteil im Molassebecken ab.		
Felsisohypsenkarte GA25	Aarau: GRAF & WILLENBERG (2011 a) Baden: GRAF (2007) Balsthal: GRAF & WILLENBERG (2014) Murgenthal: GRAF & WILLENBERG (2011 b) Romanshorn: ZAUGG et al. (2008) Schöffland: GRAF & WILLENBERG (2012) Uster: WYSSLING (2008) Winterthur: FRANK et al. (2011) Zürich: SCHINDLER et al. (2015)	Isohypsen der Felsoberfläche des GA25: Aarau, Baden, Balsthal, Murgenthal, Romanshorn, Schöffland, Uster, Winterthur und Zürich	Äquidistanz: 10 m	Bohrungen, reflexionsseismische Daten, Gutachten

### ***Kantonale Modelle***

In den Kantonen Genf, Waadt und Solothurn sind verschiedene Felsoberflächenmodelle verfügbar (Fig. 4-3). Im Kanton Genf wird der ganze Kanton durch eine Felsisohypsenkarte abgedeckt. Im Kanton Waadt gibt es sieben regionale Felsoberflächenmodelle, welche grosse Gebiete des Kantonsgebiets abdecken. Die im Molassebecken liegenden Teile des Kantons Solothurn sind ebenfalls mit einer Felsisohypsenkarte abgedeckt.

Die Datengrundlage dieser kantonalen Modelle weicht nicht stark von der GeoMol-Datenbank ab. Zusätzlich weisen diese Karten eine hohe Aktualität auf, da sie in den Jahren 2013 und 2014 erstellt wurden.

### ***Felsisohypsenkarten GA25***

Zu neun Kartenblättern des GA25 gibt es Felsisohypsenkarten (Aarau, Baden, Balsthal, Murgenthal, Romanshorn, Schöftland, Uster, Winterthur und Zürich). Die Isohypsen der Felsoberfläche weisen eine Äquidistanz von 10 m auf und wurden auf der Grundlage von Bohrungen, reflexionsseismischen Daten und Gutachten erstellt (GRAF 2007, WYSLING 2008, ZAUGG et al. 2008, FRANK et al. 2011, GRAF & WILLENBERG 2011a, GRAF & WILLENBERG 2011b, GRAF & WILLENBERG 2012, GRAF & WILLENBERG 2014, SCHINDLER et al. 2015).

### ***Sonstige Informationen über die Felsoberflächentopographie***

Neben den bisher aufgezählten schon bestehenden Felsoberflächenmodellen gibt es weitere Publikationen mit Informationen über die Topographie der Felsoberfläche. So bieten kantonale Untersuchungen zu Grundwasser oder Baugrundklassen anhand von Profilen gute Hinweise auf die Felsoberflächentopographie. Diese Daten wurden bei der Anpassung an die Grundlagedaten (Kap. 5.3.5.1) zur Verifizierung der Felsoberfläche von GeoMol17 verwendet.

## **4.7.2 Datenaufbereitung**

Der erste Schritt der Modellierung der Felsoberfläche beinhaltet die Beschaffung der Bohrdaten, deren Prüfung und die Bereitstellung für die Modellierung. Je nach Quelle gestaltete sich dieser Prozess unterschiedlich, da die Bohrdaten zum Beispiel unterschiedlich umfangreich abgelegt und/oder in unterschiedlicher Qualität vorliegen. Je nach Quelle konnte deswegen auf umfangreiche Datenbanken abgestützt oder die Informationen manuell aus den jeweiligen Bohrprofilen herausgesucht und erfasst werden. In einem zweiten Schritt wurden die weiteren Grundlagedaten beschafft und bereitgestellt. Diese wurden als korrekt angenommen und bei der Felsmodellierung direkt so verwendet, wie sie vorhanden sind.

Für die nachfolgende Modellierung ist die folgende Unterscheidung sehr wichtig (LANDESGEOLOGIE 2015):

- Gebiete, wo der Fels aufgeschlossen oder unter geringmächtiger Quartärbedeckung liegt und
- Gebiete, wo der Fels durch quartäres Lockergestein von unbekannter Mächtigkeit überdeckt ist.

Zur Unterscheidung dieser Gebiete wurde im Schweizer Mittelland zusätzlich der GeoCover Datensatz (Vektordaten 1:25 000) hinzugezogen. In den Alpentälern wurde ein-fachheitshalber die geologische Karte der Schweiz 1:500 000 verwendet. Dieser Zwischenschritt war notwendig, um Gebiete mit aufgeschlossenem Fels oder Fels unter geringmächtiger Lockergesteinsbedeckung isolieren zu können. Damit konnten die topographischen Höhenlinien aus der Landeskarte ausgeschnitten werden, welche direkt in die Herstellung des Modells der Felsoberfläche miteinbezogen wurden (LANDESGEOLOGIE 2015).

## **4.8 Weitere Oberflächendaten**

Als Grundlage für die Interpretation beziehungsweise Modellierung von GeoMol17 wurden neben den geologischen und tektonischen Karten verschiedene andere Oberflächendaten von swisstopo verwendet:

- Topographische Landeskarten 1:25 000 (LK25)
- Orthophotos SWISSIMAGE, eine Zusammensetzung digitaler Farbluftbilder der Schweiz
- Digitale Terrainmodelle: DHM25, das landesweite digitale Terrainmodell der Schweiz auf Basis der Landeskarte 1:25 000, mit Maschenweite von 25 m (SWISSTOPO 2005) und swissALTI<sup>3D</sup>, das hoch aufgelöste digitale Terrainmodell, welches die Geländeformen der Schweiz und des Fürstentums Liechtenstein ohne Bewuchs und Bebauung beschreibt (SWISSTOPO 2017).

## 5. Methodik und Vorgehen

### 5.1 Ausgangssituation

Die Methodik zur Erstellung der beiden Modelle GeoMol15 und GeoMol17 unterscheidet sich in vielen Bereichen. Die Ursache für diese Unterschiede lassen sich grösstenteils auf die Projekteinteilung zurückführen. Während das gesamte Modell von GeoMol15 basierend auf einer einheitlichen Datengrundlage (SOMMARUGA et al. 2012) durch swisstopo erstellt wurde, wurde die Modellierung von GeoMol17 in sechs Teilgebiete aufgeteilt, die jeweils von verschiedenen Projektpartnern bearbeitet wurden. Auf diese Weise entstanden zwei Modelle: GeoMol15 – ein vergleichsweise einfaches Modell, und GeoMol17 – ein detailliertes Modell mit höherer struktureller Auflösung.

Da die Modellierung von GeoMol15 und den verschiedenen Teilmodellen von GeoMol17 während der gleichen Zeitspanne durchgeführt wurde, haben sich unabhängig voneinander unterschiedliche Vorgehensweisen entwickelt. Die Herausforderungen im Zusammenhang mit der 3D-Modellierung des Schweizer Molassebeckens wurden unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Anforderungen mit verschiedenen Ansätzen gelöst. Auf die Vorgehensweise zur Erstellung von GeoMol15 wird im Kapitel 5.2 genauer eingegangen. Das Kapitel 5.3 behandelt die Methodik von GeoMol17. Es wird zunächst auf die Unterschiede in der Methodik in den verschiedenen Teilgebieten hingewiesen, danach werden die verschiedenen Arbeitsschritte im Bereich des Teilmodells Landesgeologie genauer beschrieben.

### 5.2 GeoMol 15

#### 5.2.1 Generelle Vorgehensweise

Zur Erstellung von GeoMol15 wurden hauptsächlich die Resultate des Seismischen Atlas des Schweizer Molassebeckens von SOMMARUGA et al. (2012) verwendet. Im Rahmen dieser Publikation wurde ein Grossteil der vorhandenen Reflexionsseismik des gesamten Molassebeckens einheitlich interpretiert. Zuletzt wurde aus jedem seismisch interpretierten Horizont jeweils ein Raster in Zeit und eines in Tiefe berechnet. Mit diesen berechneten Flächen entstand ein erstes, einfaches 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens.

Die wesentlichsten Unterschiede zwischen GeoMol15 und dem 3D-Modell des SASMB liegen in der Horizontmodellierung im Bereich der Ausbisslinie von Basis «Känozoikum», der exakten Anpassung der Horizonte an die Bohrmarker der Tiefbohrungen (Bohrungskalibrierung), die Modellierung von Hauptstörungszonen sowie die zusätzli-

che Modellierung von känozoischen Horizonten und der Felsoberfläche.

Anhand einer schematischen Darstellung (Fig. 5-1) wird die Vorgehensweise zur Erstellung von GeoMol15 erklärt. Bei den wichtigsten Arbeitsschritten wird im Schema auf die jeweiligen Kapitel hingewiesen. In einem ersten Teil werden die generellen Arbeitsschritte des SASMB von der Interpretation der seismischen Daten bis hin zur Berechnung von Horizontrastern in Zeit und Tiefe erklärt (Kap. 5.2.2 u. 5.2.3). Danach werden die Anpassungen und Aufbereitung der SASMB-Grundlage für die Horizontmodellierung von GeoMol15 beschrieben (Kap. 5.2.4). Und zuletzt werden die wichtigsten Arbeitsschritte der Störungsmodellierung aufgeführt (Kap. 5.2.5).

#### 5.2.2 Seismische Interpretation

Die seismische Interpretation des SASMB umfasst die wichtigsten acht seismischen Horizonte, die über das gesamte Schweizer Molassebecken kartierbar sind. Diese Markerhorizonte liegen auf oder in der Nähe von wichtigen stratigraphischen Grenzen und wurden mit den Formationsgrenzen aus Bohrungen abgeglichen. Die wichtigsten Störungen, welche die seismischen Horizonte versetzen, wurden interpretiert. Die Interpretation der einzelnen seismischen Sektionen wurde anschliessend in einer GIS-Datenbank auf eine einheitliche Referenzhöhe von 500 m ü. M. angeglichen. Die Zeitdifferenzen an seismischen Sektionskreuzungen (Misties) wurden grösstenteils mit einem Mistie-Korrekturverfahren verringert. Die Vorgehensweise zu diesen Korrekturen wurde von SOMMARUGA et al. (2012) detailliert beschrieben.

#### 5.2.3 Geschwindigkeitsmodell

Tiefbohrungen mit Check-shots geben Auskunft über die Lage der in der Bohrung aufgenommenen stratigraphischen Horizonte in Zeit sowie auch in der Tiefe. Anhand von den gemessenen Zeit-Tiefen-Werten lassen sich Intervallgeschwindigkeitsraster berechnen. Um eine realistische Extrapolation in ein Gebiet mit einer geringen Datendichte zu ermöglichen, war die Einführung von zusätzlichen Stützpunkten notwendig. Grösstenteils befinden sich diese in Randgebieten des Molassebeckens, welche nicht mehr ausreichend von bestehenden Tiefbohrungen kontrolliert werden können (Fig. 5-2). Die Geschwindigkeitsraster wurden in ArcGIS mit dem Thin-plate-Algorithmus berechnet. Gleich wie bei den Horizontberechnungen in Zeit wurde bei den Geschwindigkeitsrastern eine Maschenweite von 100 x 100 m gewählt. Aufgrund der geringen Datendichte

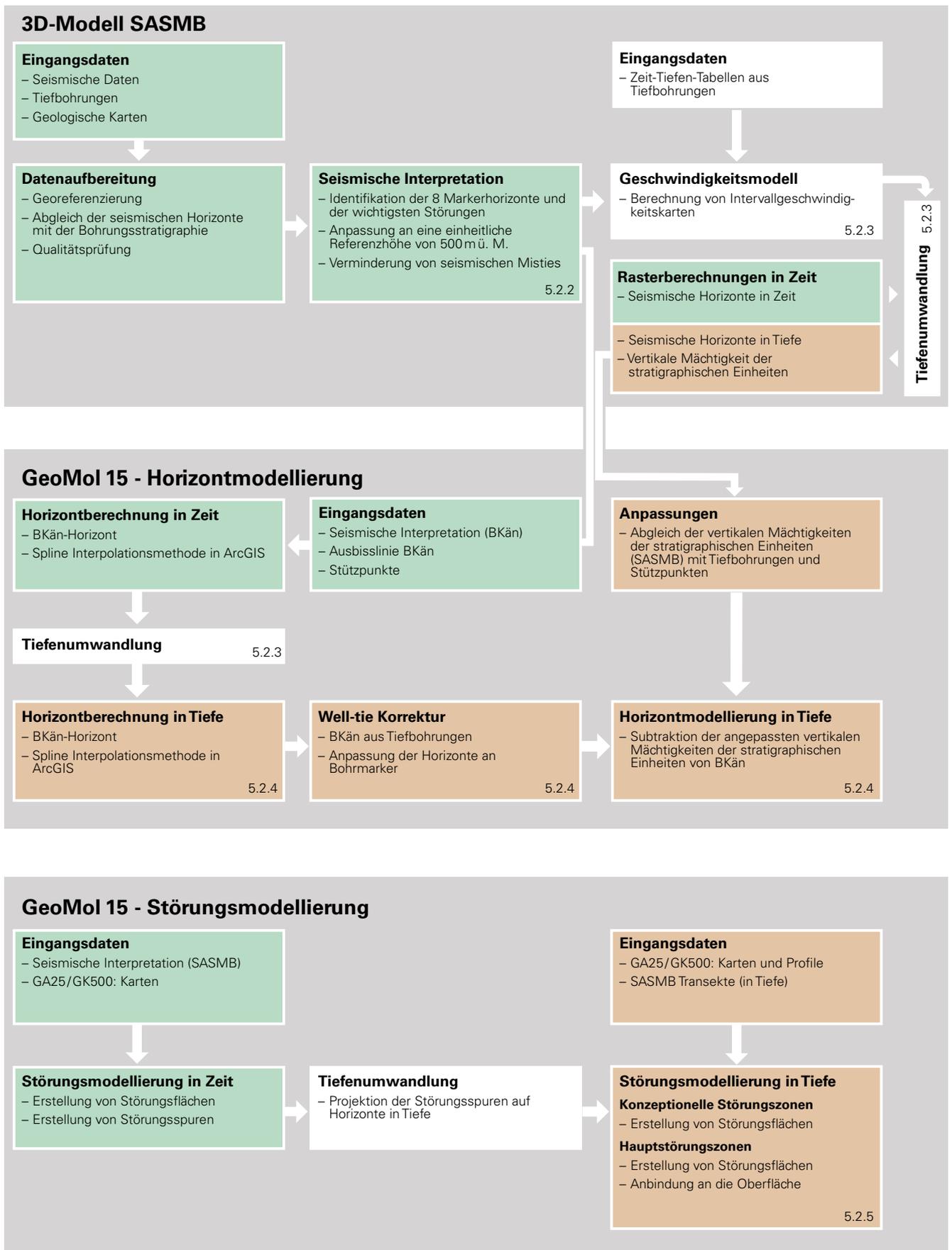


Fig. 5-1: Schematischer Arbeitsablauf zur Erstellung von GeoMol 15. Im obersten grauen Block wird die Vorgehensweise von SOMMARUGA et al. (2012) zur Berechnung der seismischen Horizonte in Zeit und Tiefe beschrieben. Der mittlere graue Block zeigt die Anpassungen der SASMB-Horizonte zur Erstellung von GeoMol 15. Im untersten grauen Block werden die Arbeitsschritte zur Modellierung der Störungen dargestellt. Arbeitsschritte in Zeit sind grün, diejenigen in der Tiefe sind orange eingefärbt.

**Intervallgeschwindigkeitskarte  
GeoMol 15**

(Isolinienintervall 200 m/s)

Dogger

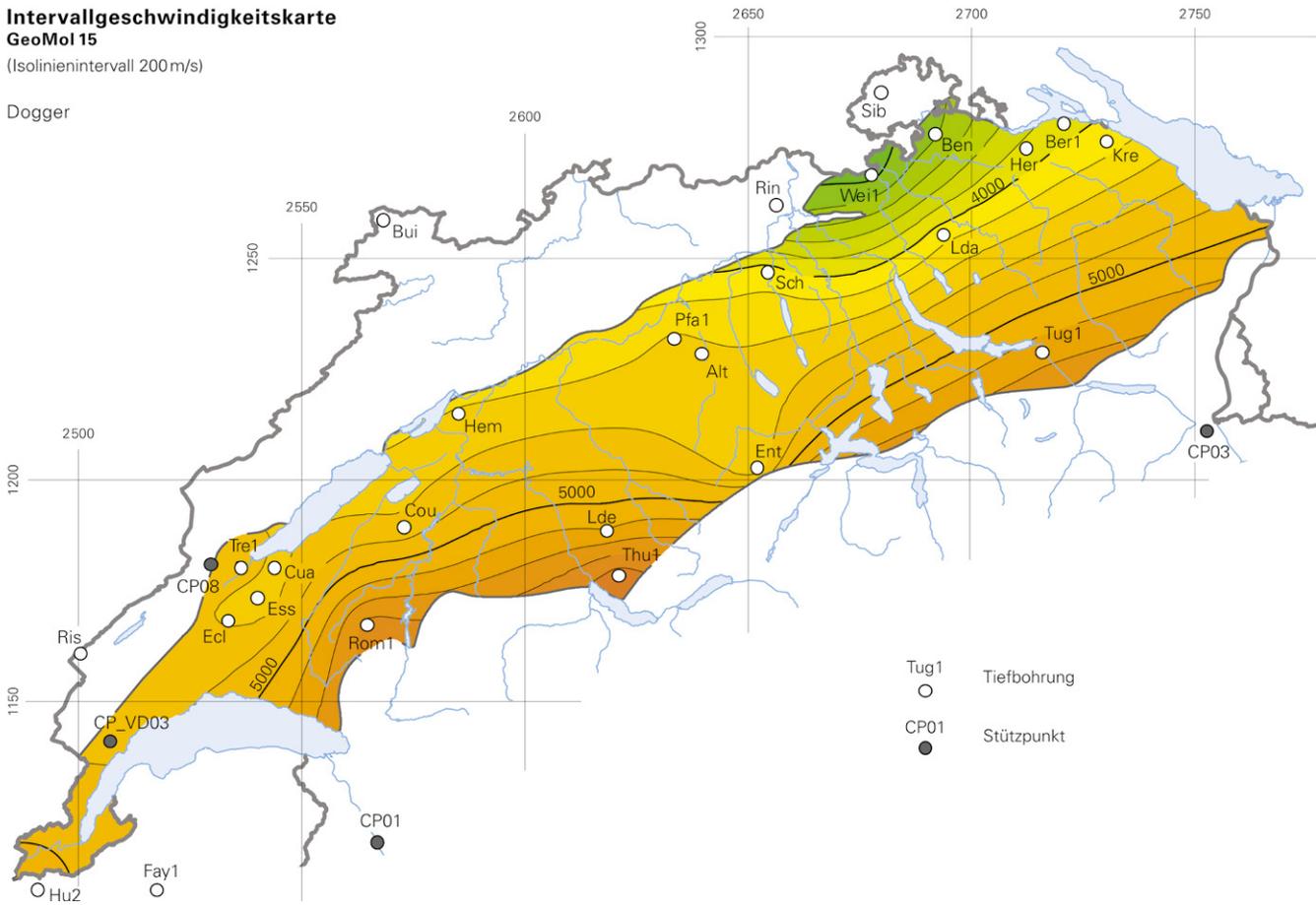


Fig. 5-2: Intervallgeschwindigkeitskarte (GeoMol15) des seismischen Intervalls Dogger mit Lokalisierung der Tiefbohrungen und Stützpunkte, deren Zeit-Tiefen-Werte in die Berechnung des Geschwindigkeitsrasters eingeflossen sind (SOMMARUGA et al. 2012, überarbeitet).

stellen die interpolierten Geschwindigkeitsraster nur eine Annäherung an die generellen Trends des Schweizer Molassebeckens dar (Fig. 5-2).

**5.2.4 Horizontmodellierung**

In den folgenden Unterkapiteln werden je nach Datengrundlage drei verschiedene Arbeitsabläufe zur Erstellung der Modellhorizonte beschrieben. Allen gemein ist eine Modellrasterauflösung von 100x100 m.

**5.2.4.1 Topographie und Felsoberfläche**

Der Topographiehorizont wurde aus dem Rasterdatensatz des digitalen Höhenmodells DHM25 erarbeitet, indem die Zellengröße des Rasters auf eine Auflösung von 100x100 m angepasst wurde.

Für die beiden Modelle GeoMol15 und GeoMol17 wurde ein einheitliches Höhenmodell der Felsoberfläche mit zwei verschiedenen Auflösungen berechnet. Die generelle Vorgehensweise zur Modellierung dieses Horizonts kann daher dem detaillierten Modell GeoMol17 entnommen werden (s. a. Kap. 5.3.5.1).

**5.2.4.2 Molassehorizonte**

In der mittelländischen Molasse wurden die Horizonte TOMM und TUSM als individuelle Horizonte modelliert, in der subalpiner Molasse wurden die Molassesedimente hingegen nicht weiter unterteilt.

Da die seismischen Reflektoren der Molasse-Einheiten nicht eindeutig über das gesamte Molassebecken verfolgt werden konnten, wurde im SASMB auf eine Interpretation der känozoischen Einheiten verzichtet. Für die Modellierung von GeoMol15 wurde daher auf die Interpretation der Nagra (ROTH et al. 2010) zurückgegriffen. Die Isolinien der beiden Molassehorizonte wurden an die im Rahmen von GeoMol15 verwendeten Bohrungen und an die Ausbisslinien an der Oberfläche angepasst. Im Grenzgebiet zu Baden-Württemberg mussten im Zuge des Grenzabgleichs zum EU-Modell grössere Anpassungen der Isolinien durchgeführt werden. Nach diesen Verbesserungen wurden die korrigierten Isolinien zusammen mit den Bohrungen und der Ausbisslinie in ArcGIS mit der Interpolationsmethode Topo-zu-Raster zu einer Horizontfläche interpoliert.

### 5.2.4.3 Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum»

Die Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum» wurden für GeoMol15 in mehreren Arbeitsschritten modelliert. Zuerst wurde für die Berechnung des Basis-«Känozoikum»-Horizonts die Interpretation des Basis-«Tertiär»-Horizonts des SASMB in Zeit verwendet. Im Gegensatz zu den Rasterberechnungen des SASMB wurde die Ausbisslinie des Horizonts Basis «Känozoikum» (in Zeit) sowie Stützpunkte mit in die Interpolation einbezogen. Die Horizontberechnung wurde in ArcGIS mit der Spline-Interpolationsmethode durchgeführt. Mit einem Korrekturraster wurde dieser Horizont mit den Bohrungen in Zeit abgeglichen. Danach wurde der Basis-«Känozoikum»-Horizont mit dem zuvor beschriebenen Geschwindigkeitsmodell des SASMB (Kap. 5.2.3) in Tiefe umgewandelt.

Der Basis-«Känozoikum»-Horizont wurde anschliessend an die Ausbisslinie, an Bohrungen und an Profile des GA25 angepasst. Die Angleichung an die geologischen Profile fand grösstenteils in einem Bereich bis 2000 m von der Ausbisslinie entfernt statt, um auf diese Weise den Horizont passend an die Oberfläche anzubinden. Hierfür wurde wiederum ein Korrekturraster verwendet.

Zur Berechnung der darunterliegenden Horizonte in Tiefe wurden die vertikalen Mächtigkeitsraster der stratigraphischen Einheiten des SASMB verwendet. Für GeoMol15 wurde die Mächtigkeit der stratigraphischen Einheiten an Bohrungen und geologische Profile angeglichen. Ausgehend vom angepassten Basis-«Känozoikum»-Horizont wurde die Lage der darunterliegenden mesozoischen Horizonte berechnet, indem die jeweilige stratigraphische Mächtigkeit vom darüber liegenden Horizont abgezogen wurde.

### 5.2.5 Störungsmodellierung

Je nach Datengrundlage wurden bei der Modellierung der wichtigsten Störungen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen angewendet. Als Hauptstörungen definierte Störungen wurden anhand von seismischen Daten interpretiert und aus diesem Grund vorerst in Zeit modelliert und dann in Tiefe umgewandelt. Konzeptionelle Störungen stützen sich auf geologische Karten und Profile und wurden daher direkt in Tiefe modelliert.

#### 5.2.5.1 Hauptstörungszonen

Die modellierten Strukturen des Modells GeoMol15 basieren auf der Störungsinterpretation des SASMB. Für die Anbindung der Störungen an der Oberfläche wurden geologische Karten und Profile (GA25 und GK500) verwendet. Die zur Modellierung geeigneten Störungszonen sollten bekannte Strukturen aus seismischen Interpretationen oder geologischen Karten sein. Ausgehend von interpretierten Störungen in seismischen Sektionen, wurden erste Störungsflächen in der Zeitdomäne modelliert. Die Schnittlinien zwischen den modellierten Horizonten und den Störungen konnten anschliessend in Tiefe umgewandelt werden. Zusätzliche Oberflächendaten aus Karten und Profilen wurden in die Störungsmodellierung einbezogen, sodass die bekannt-

ten Ausbisse der Strukturen an der Oberfläche berücksichtigt werden konnten. Für GeoMol15 wurde der Versatz entlang von Störungen nicht modelliert.

#### 5.2.5.2 Konzeptionelle Störungszonen

Um die Störungen der Triangelzone der subalpinen Molasse zu modellieren, musste zuerst deren Störungsspur an der Oberfläche vereinheitlicht werden. Die Informationen dazu wurden hauptsächlich den Karten des GA25 und der geologischen Karte 1:500 000 entnommen, zudem dienten die Profile der Geologischen Spezialkarte «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» 1:100 000 als Grundlage. Die konzeptionellen Störungen aus den geologischen Profilen des SASMB halfen den Verlauf der Triangelzone in der Tiefe festzulegen. Mit Unterstützung von Störungsisolinien wurden die verschiedenen Datensätze miteinander verbunden. Auf diese Weise konnten diese grossräumigen Strukturen zusammenhängend konstruiert werden.

## 5.3 GeoMol 17

### 5.3.1 Generelle Vorgehensweise

Anders als bei GeoMol15 setzt sich GeoMol17 aus mehreren Teilmodellen der beteiligten Projektpartner zusammen. Unterschiedliche Datengrundlagen, verschiedene Modelliersoftware und andere Schwerpunktsetzung führten dazu, dass sich die Methodik der einzelnen Modellgebiete zum Teil stark unterscheidet. In Tabelle 5-1 ist ersichtlich, auf welche Methode sich die Projektpartner abgestützt haben und welche Software für die verschiedenen Arbeitsschritte genutzt wurde. Dabei wird deutlich, dass für die gleiche Problemstellung unterschiedliche technische Herangehensweisen zum Ziel führen können. Dies zeigt sich hauptsächlich bei der Modellierung der Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum», die sich grösstenteils auf seismischen Daten stützen. Neben unterschiedlicher Interpretations- und Modelliersoftware ist vor allem der Zeitpunkt der Tiefenumwandlung für die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Modellierung ausschlaggebend. So wurde bei einigen Teilmodellen die Horizonte bereits in der Zeit zu Rastern interpoliert und erst anschliessend mit zusätzlichen Tiefendaten abgestimmt. Andere Bearbeiter wandelten bereits die seismische 2D-Interpretation eines Horizonts in Tiefe um und führten danach die weiterführende Horizontmodellierung unter Berücksichtigung weiterer Tiefendaten durch.

Bei der Beschreibung der Methodik wird aufgrund der grossen Unterschiede hauptsächlich auf die von swisstopo angewendete Methodik eingegangen. Die Methodik, welche in den anderen Teilgebieten verwendet wurde, ist in separaten Berichten detailliert beschrieben (CLERC 2016, GRUBER et al. 2016, HUGGENBERGER et al. 2016, MARCHANT & BAUER 2016, MOCK 2016).

Das Modelliergebiet der Landesgeologie wurde zur einfacheren Bearbeitung in einen untiefen und einen tiefen Bereich aufgeteilt. Diese Aufteilung war aufgrund der Anbindung des Modells an die Oberfläche und der unter-

schiedlichen Datengrundlagen notwendig. Letztere führten auch dazu, dass die Vorgehensweisen bei der Modellierung in den einzelnen Landesgeologie-Teilmodellen sehr verschieden waren.

Im tiefen Modell wurde ausschliesslich mit seismischen Daten und mit Tiefbohrungen gearbeitet. Die zur Verfügung stehenden seismischen Daten widerspiegeln die geologischen Gegebenheiten im tiefen Untergrund sehr genau, erweisen sich hingegen nahe der Oberfläche für die Modellierung als wenig geeignet. In den untiefen Modellen sind vor allem Bohrungen, geologische Karten und Profile in die Modellierung eingeflossen. Die geologischen Gegebenheiten am Nordrand dieses Modellgebiets (Jurasüdfuss) wurden auf zahlreichen geologischen Karten und Profilen detailliert beschrieben. Zudem wurden viele untiefe Bohrungen in dieser Region in die Modellierung eingebunden und die bereits tiefenkonvertierten seismischen Interpretationen der Nagra aus der Etappe 2 des Sachplans Geologische Tiefenlager verwendet. In einem letzten Schritt mussten die drei Modelle, wie auch die anderen Teilmodelle der Partner, auf einander abgeglichen und zusammengefügt werden.

Im Folgenden wird zuerst die seismische Interpretation des tiefen Modells erklärt (Kap. 5.3.2). Dann werden die Erstellung des GeoMol-Geschwindigkeitsmodells und die anschließende Tiefenumwandlung besprochen (Kap. 5.3.4). Das Kapitel Horizontmodellierung (Kap. 5.3.5) stellt die Vorgehensweise zur Modellierung der Felsoberfläche, der Molassehorizonte und der Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum» vor und unterscheidet die Arbeitsschritte des tiefen und der untiefen Modelle. Die Arbeitsschritte zur Modellierung der Störungen und deren Versatz werden im Kapitel 5.3.6 behandelt. Zuletzt zeigt das Kapitel 5.3.7 die Methodik wie die unterschiedlichen Modelle auf einander abgestimmt und zu einem gesamten Modell zusammengefügt wurden.

### 5.3.2 Seismische Interpretation

Für das Teilmodell Landesgeologie tiefes Modell von GeoMol17 wurden als Ausgangsbasis die seismischen Interpretationen der Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) verwendet. So konnte mit einer grossflächigen, bereits erstellten und geprüften Interpretation gestartet werden.

Nachdem die seismischen Sektionen und deren Interpretationen in die Interpretationssoftware Seisvision geladen waren, wurden sie mit den Beilagen der Nagra Arbeitsberichte NAB 10-39 und NAB 10-40 (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) visuell verglichen, um zu gewährleisten, dass die Interpretationen mit den passenden Reflektoren übereinstimmen. Zugleich diente diese Prüfung, ob die Gesamtshifts der seismischen Sektionen korrekt eingetragen wurden. Zusätzliche, uninterpretierte seismische Sektionen wurden in das Interpretationsprojekt geladen und in das Netzwerk von bereits interpretierten seismischen Sektionen eingehängt. Bei der Interpretation dieser Sektionen wurde darauf geachtet, möglichst die gleichen Reflektoren wie diejenigen der Nagra-Interpretationen zu kartieren. Interpretationen der Horizonte Top unterer Malm und Top Keuper wurden im Modellierungsgebiet durch die Landesgeologie ausgeführt (s. a. Kap. 4.6.1).

Einer lithologischen Einheit kann mitunter ein charakteristisches seismisches Abbild zugeordnet werden. Diese sogenannte seismische Fazies wird mithilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen geeicht. Abgesehen von der Lithologie beeinflussen verschiedene andere Faktoren das seismische Abbild (ROTH et al. 2010). Dazu gehören die Heterogenität der seismischen Daten, die variable Tiefenlage der interpretierten Horizonte und laterale Fazieswechsel in den Sedimenten. Folglich ist es nicht möglich, über grosse Distanzen (z.B. das ganze Schweizer Molassebecken) hinweg, ein bestimmtes Reflektorpaket einer stratigraphischen Einheit zuzuweisen. Vielmehr muss von den wenigen Tiefbohrungen ausgehend interpretiert werden (ROTH et al. 2010).

Im Zuge der für die Modellierung übernommenen seismischen Interpretation der Nagra wurde bereits darauf geachtet, mit der Interpretation auf einer seismischen Sektion anzufangen, welche eine Tiefbohrung kreuzt, um die vertikale Abweichung zwischen Bohrung und interpretiertem Reflektor minimal zu halten. Im Rahmen vom GeoMol-Projekt wurde die Passgenauigkeit zwischen Bohrung und Seismik nochmals geprüft. Ergänzende Horizont-Interpretationen wurden möglichst entlang von Amplituden-Maxima oder -Minima gemacht, in wenigen Fällen auch entlang von Null-Durchgängen (s. a. Anh. A5-1 und Kap. 3).

Neu interpretierte Störungen wurden analog zu früheren Arbeiten (ROTH et al. 2010, MEIER 2010, SOMMARUGA et al. 2012) an Amplituden-Enden oder Amplituden-Versätzen interpretiert. Bei der strukturellen Interpretation wurde darauf geachtet, dass Versätze der Reflektoren auf möglichst mehreren Markerhorizonten erkennbar sind. Auf einer seismischen Sektion erkannte und vermutete Störungen wurden auf benachbarten seismischen Sektionen gesucht. Dabei muss das von der Oberfläche her bekannte tektonische Muster mitberücksichtigt werden. Kann eine vermutete Störung auf einer oder mehreren benachbarten seismischen Sektionen erkannt werden, unterstützt dies die ursprüngliche Interpretation auf der Ausgangssektion. Mit der Interpretationssoftware wurde zuerst die Störungsgeometrie (Fault stick) interpretiert und danach der Versatz des interpretierten Reflektors an der interpretierten Störung (Fault heave, in Fig. 5-8). Der interpretierte Versatz wird in Zweiweglaufzeit gemessen. Wenn der Versatz auf einer einzelnen seismischen Sektion kartiert wurde, wird er in der Kartenansicht als Linie dargestellt. Die Kartenansicht zeigt ein Polygon, wenn der Versatz auf zwei oder mehr seismischen Sektionen kartiert wurde.

Nach der abgeschlossenen Interpretation fand ein erster Arbeitsschritt zur Qualitätssicherung statt, indem Isochronenkarten aller interpretierten Horizonte erstellt wurden. Diese deckten in der Regel Unstimmigkeiten in der Interpretation auf, welche vor dem endgültigen Export korrigiert wurden.

Die Horizont- und Störungsinterpretationen wurden als ASCII-Dateien exportiert und weiterbearbeitet.

Tab. 5-1: Überblick über die Vorgehensweise zur Modellierung von Horizonten in den verschiedenen Teilmodellen. Ausführlicher wird die Methodik der Teilmodelle in den entsprechenden Arbeitsberichten beschrieben.

Teilmodelle	Genf	Waadt	Freiburg	Bern	Landesgeologie tiefes Modell	Landesgeologie untiefes Modell NW	Landesgeologie untiefes Modell NE	Bodensee
	CLERC (2016)	MARCHANT & BAUER (2016)	GRUBER et al. (2016)	MOCK (2016)				HUGGENBERGER et al. (2016)
Felsoberfläche								
Software	ArcGIS							
Methode	Topo zu Raster							
Bemerkungen	Einheitliche Modellierung swisstopo							
Molassehorizonte								
Software	-	IHS Kingdom	Move™	IHS Kingdom / ArcGIS	ArcGIS / Move™			IHS Kingdom, ArcGIS, GoCAD
Methode	-	Flex Gridding	Krigging und Spline mit Barrieren	Flex Gridding	Topo zu Raster			Spline mit Barrieren
Bemerkungen	Keine TUSM/TOMM-Horizonte im Modellgebiet.	Seismische Interpretation wurde in Modellierung einbezogen, ergänzt durch Bohrdaten und topographische Ausbisslinien.	Modellierung mit Bohrdaten und topographischen Ausbisslinien.	Seismische Interpretation wurde in Modellierung einbezogen, ergänzt durch Bohrdaten und topographische Ausbisslinien.	Seismische Interpretation wurde in Modellierung einbezogen, ergänzt durch Bohrdaten und topographische Ausbisslinien.			Seismische Interpretation wurde in Modellierung einbezogen, ergänzt durch Bohrdaten und topographische Ausbisslinien.
Horizonte von BKän bis BMes								
Seismische Interpretation								
Software	Petrel E&P	IHS Kingdom	Move™	IHS Kingdom	Seisvision	-	-	IHS Kingdom
Bemerkungen	Ausgangslage: eigene Interpretation; andere Interpretationen, Berichte und Publikationen als Interpretationshilfe (GORIN 1989, GORIN et al. 1993, SIGNER & GORIN 1995, PAO-LACCI 2012)	Ausgangslage: verschiedene Interpretationen (SOMMARUGA et al. 2012, CAPAR et al. 2015, verschiedene publizierte Berichte).	Ausgangslage: Interpretation (SOMMARUGA et al. 2012) ergänzt mit eigener Interpretation von zusätzlichen seismischen Sektionen.	Ausgangslage: Interpretation SGT Etappe 1 (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) ergänzt mit eigener Interpretation von zusätzlichen seismischen Sektionen.	Ausgangslage: Interpretation SGT Etappe 1 (ROTH et al. 2010) ergänzt mit eigener Interpretation von zusätzlichen seismischen Sektionen.	Keine seismische Interpretation verwendet.	Keine seismische Interpretation in Zeit verwendet.	Ausgangslage: Interpretation SGT Etappe 1 (ROTH et al. 2010) ergänzt mit eigener Interpretation von zusätzlichen seismischen Sektionen (u.a. Bodenseeseismik).

Teilmodelle	Genf	Waadt	Freiburg	Bern	Landesgeologie tiefes Modell	Landesgeologie untiefes Modell NW	Landesgeologie untiefes Modell NE	Bodensee
	CLERC (2016)	MARCHANT & BAUER (2016)	GRUBER et al. (2016)	MOCK (2016)				HUGENBERGER et al. (2016)
Mistie-Reduktion								
Software	Petrel E&P	IHS Kingdom	Move™	IHS Kingdom	MATLAB	-	-	IHS Kingdom
Bemerkungen	Manuelle Mistie-Reduktion von sichtbaren Unstimmigkeiten an seismischen Sektionskreuzungen durch Laufzeitverschiebungen.	Bulk-shift um ganze Linien anpassen. Übrige Misties: Mistie-Reduktionsfunktion in IHS Kingdom.	Methode SASMB	Methode: Bulk-shift um ganze Linien anzupassen sowie Constant Shift und Exact Fit um Horizont-Misties zu minimieren.	Reduktion von Initial Misties; Glättung von Horizontpicks.			Methode: Exact Fit.
3D-Horizontmodellierung in Zeit								
Software	Petrel E&P	IHS Kingdom	ArcGIS	IHS Kingdom		-	-	ArcGIS
Methode	Convergent Interpolation	Flex Gridding	Spline mit Barrieren	Flex Gridding				Spline mit Barrieren
Bemerkungen			Störungsspuren als Barrieren. Anschliessende Korrektur und Anpassungen der Zeithorizonte.	Störungspolygone als Barrieren. Anschliessende manuelle Korrektur von allfälligen Artefakten in 2D.	Keine 3D-Zeithorizonte (Raster) erstellt.			Störungspolygone als Barrieren.
Geschwindigkeitsmodell								
Bemerkungen	Einheitliches Geschwindigkeitsmodell swisstopo für Molasse-Einheiten: durchschnittliche Geschwindigkeiten Top Fels bis Basis «Känozoikum» für Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum»: gestapelte Intervallgeschwindigkeiten							
Tiefenumwandlung								
Software	Petrel E&P	IHS Kingdom	IHS Kingdom	IHS Kingdom	Petrosys, Move™			IHS Kingdom
Methode	Convergent Interpolation	Layer Cake (Dynamic Depth Conversion)	Dynamic Depth Conversion	Dynamic Depth Conversion and Map Update				Extended Math Calculator
Bemerkungen	3D-Geschwindigkeitsmodell erstellt aus Intervallgeschwindigkeitskarten von swisstopo.			Iterativer Prozess mit Einbindung von Kontrollpunkten, um Artefakte im Tiefenraster zu bereinigen.	Tiefenumwandlung von interpretierten seismischen Sektionen; Korrektur von Horizont-Störung-Artefakten; Reduktion von restlichen Misties.			

3D-Horizontmodellierung in Tiefe							
Software	Petrel E&P	IHS Kingdom	Move™	Petrosys, Move™	ArcGIS, Move™	ArcGIS, Surfer	
Methode	Convergent Interpolation / Gridding	Flex Gridding mit tiefenumgewandelten Horizonten, Bohrdaten und Ausbisslinien.	Explizites Modellieren: Erstellen von Meshes zwischen mehreren Profilschnitten.	Minimum-Curvatures-Algorithmus, Bikubische Interpolationsmethode.	Topo zu Raster	Radial Basis Function	
Bemerkungen		Korrektur der Tiefenhorizonte bei Störungen.	Betrifft untiefes Modell, bei tiefem Modell keine Horizontmodellierung in Tiefe.	Bei Aufschubungen: Einfügen von Horizont-Patches zur Modellierung des Überschiebungsbereichs.	Ausgangslage: Geologische Karten und Profile, Bohrdaten.	Ausgangslage: Interpretation SGT Etappe 2 (NAGRA 2014) in Tiefe	Störungsspuren als Barriere. Modellierung von Modellsegmenten.
Bohrungskalibration							
Software	Petrel E&P	IHS Kingdom	Move™	Petrosys			IHS Kingdom
Methode	Korrekturraster erstellt mit Convergent Interpolation.	Horizon Flattening Tool	Reshape Tool	Korrekturraster			Korrekturraster
Bemerkungen	Korrektur der Tiefenhorizonte mit Bohrungen und Stützbohrungen.			Bohrungskalibration der seismischen 2D-Interpretation (Liniendaten).	Einbezug von Bohrungen in Modellierung.	Einbezug von Bohrungen in Modellierung.	
Anbindung an Oberfläche							
	Aufschlüsse als Stützbohrung in Modellierung einbezogen.	Anpassung der Tiefenhorizonte an Ausbisslinie.	BKän: Modellierung einer Rampenstruktur zur Anbindung an Ausbisslinie Richtung Jura.	-	Einbezug von Ausbisslinie in Modellierung.	Einbezug von Ausbisslinie (als Stützpunkte) in Modellierung.	Anbindung der Molassehorizonte an Ausbisslinie, Tiefenhorizonte beissen nicht aus.

Störungsmodellierung: Siehe Kapitel Störungsmodellierung 5.3.6

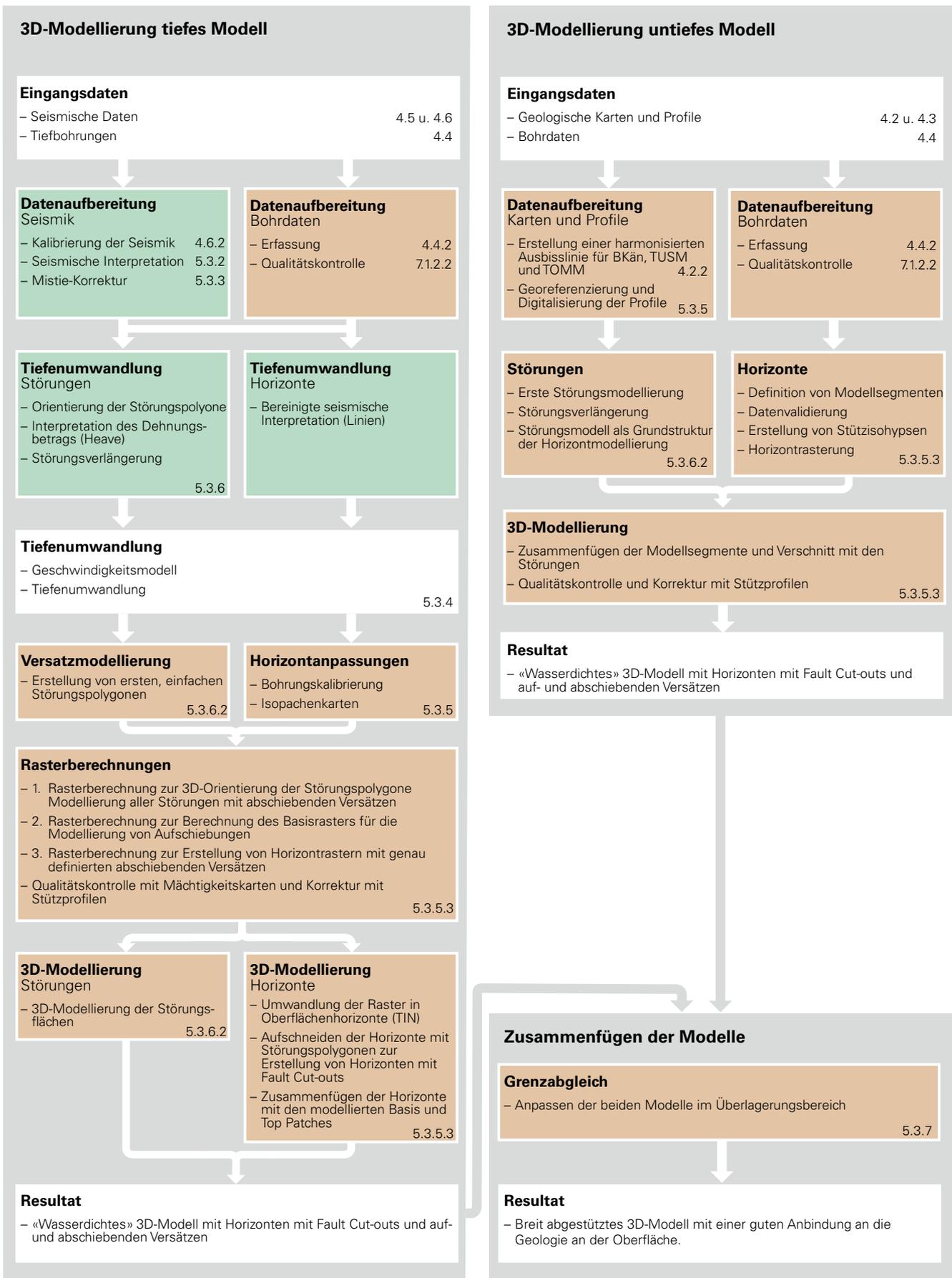


Fig. 5-3: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs zur Erstellung von GeoMol17. Das Schema zeigt die zeitliche Abfolge und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitsschritten. Analog zu Fig.5-1 sind Arbeitsschritte in der Zeitdomäne grün, diejenigen in der Tiefendomäne orange eingefärbt.

### 5.3.3 Mistie-Reduktion

Misties an sich kreuzenden Sektionen wurden korrigiert, um Artefakte im strukturellen Abbild des Untergrunds zu verhindern. Die häufigsten Ursachen für Misties im genutzten Datensatz sind die folgenden:

- Unterschiedliche statische Korrekturen der seismischen Sektionen, wie es bei seismischen Sektionen unterschiedlicher Kampagnen sehr häufig ist.
- Nicht- oder fehlerhaft dokumentiertes seismisches Referenzdatum (aus Processing / Reprocessing oder bei Export von SEG-Y-Dateien aus Interpretations-Software).
- Migrationseffekte.
- Inkonsistenzen in der Interpretation.

Um die Mistie-Reduktion durchzuführen, wurden die Horizont-Interpretationen in Zweiweglaufzeit als ASCII-Dateien aus der Interpretationssoftware exportiert. In einem weiteren Schritt wurden die ASCII-Dateien in MATLAB importiert und geprüft. Dabei wurden fehlende Interpretationsstrecken und uninterpretierte seismische Sektionen identifiziert. Fehlende Interpretationsstrecken sind meistens auf Störungen oder Strecken mit schlechter Abbildung zurückzuführen. Seismische Sektionen ohne Interpretation lassen sich meistens auf eine durchgehend schlechte Qualität zurückzuführen. In einzelnen Fällen konnte die Ursache auf ein Duplikat einer seismischen Sektion mit unterschiedlichen Namen zurückgeführt werden, wobei jeweils nur eine Version der seismischen Sektion interpretiert wurde. Inkonsistenzen in der Interpretation wurden, wo nötig, in der Interpretation vor der Mistie-Reduktion bereinigt und anschliessend nochmals exportiert. Dies kam vor allem bei sehr geringmächtigen Einheiten vor, bei denen ein geringer Mistie bereits einen bedeutenden Anteil der Gesamtmächtigkeit der Einheit ausmachen kann.

Bei der angewandten Methode wurden die Misties zunächst an den Kreuzungen der seismischen Sektionen berechnet und reduziert. Der maximale Einflussbereich der Mistie-Reduktion auf die interpretierten Horizonte in der Nähe von Sektionskreuzungen wurde vordefiniert (kreisförmig mit einem Radius von 250 m). Ausserhalb eines weiteren Einflussbereichs von 10 km von der Kreuzung seismischer Sektionen, wurde die Interpretation durch die Mistie-Korrektur gar nicht beeinflusst. Der Tiefenwert von Horizontinterpretationen wurde innerhalb von diesem Einflussbereich mit einer Spline-Interpolation neu berechnet. So konnten Oszillationen oder durch lineare Interpolation verursachte Knicke vermieden werden. Drei wichtige Voraussetzungen für die Mistie-Reduktion sind, dass erstens die auf der Seismik interpretierten Strukturen nicht verändert, zweitens die Formationsmächtigkeiten möglichst beibehalten werden und drittens die störungsbedingten Versätze in der Interpretation nicht geglättet werden. Nach einer ersten Mistie-Reduktion wurden die korrigierte Daten auf restliche Misties von mindestens 30 ms geprüft (s. a. SOMMARUGA et al. 2012) und deren Ursache identifiziert. Diese waren oftmals Störungen oder auch bisher unerkannte Inkonsistenzen in der Interpretation. Nach diesem Prü-

fungs- und Korrekturschritt wurde die Mistie-Reduktion neu berechnet. In einem letzten Schritt wurden die Horizonte geglättet. Wird dieser Schritt unterlassen, kommt es zu sehr unruhigen Horizontrastern entlang von seismischen Sektionen.

### 5.3.4 Geschwindigkeitsmodell und Tiefenumwandlung

Wie bei GeoMol15 wurden Intervallgeschwindigkeiten für die Tiefenumwandlung angewendet. Im Gegensatz zu GeoMol15 wurden jedoch die Eingangsdaten für die Intervallgeschwindigkeitsraster aktualisiert und die Intervallgeschwindigkeitsraster neu berechnet (Fig. 5-4). Der grosse Unterschied zu den Intervallgeschwindigkeiten von SOMMARUGA et al. (2012) liegt darin, dass die Werte von den Tiefbohrungen St. Gallen (SGa) und Schlattingen (SlA) wichtige zusätzliche Datenpunkte im östlichen Modellgebiet lieferten. Zusätzlich konnten Werte von Bohrungen im süddeutschen Bodenseegebiet verwendet werden. Dadurch wird das Intervallgeschwindigkeitsraster über die Schweizer Grenze hinweg durch Datenpunkte gestützt und Extrapolationseffekte werden vermindert (s. a. Fig. 5-2).

Als Basis für die Intervallgeschwindigkeiten dienen im Bohrloch gemessene Geschwindigkeitsprofile (Check-shots), bei denen an gemessenen Tiefen die seismische Einweglaufzeit registriert wird. Für die Intervallgeschwindigkeiten von GeoMol17 wurden diese Zeit-Tiefen-Paare neu berechnet, aufgrund der harmonisierten stratigraphischen Marker, wie sie von den Projektpartnern in ihren Modelliergebieten definiert wurden. Viele der Geschwindigkeitsprofile mussten neu berechnet werden, um sie auf die seismischen Referenzebene von 500 m ü. M zu eichen. In einem ersten Qualitätssicherungsschritt wurden die gelieferten Werte pro bearbeitetem Intervall geplottet, um Trends und auch Ausreisser zu erkennen. Figur 5-5A zeigt einen Plot mit allen verfügbaren Zeit-Tiefen-Paaren des Basis-«Känozoikum»-Horizonts. Die graue Linie stellt eine Trendlinie durch die Punktwolke dar, die gestrichelten Linien zeigen die Abweichung von der Trendlinie von  $\pm 10\%$ . Punkte mit weniger als 10% Abweichung von der Trendlinie wurden als vertrauenswürdig erachtet. Sämtliche Punkte mit mehr als 10% Abweichung wurden geprüft, ob sie verwendet werden können.

Idealerweise bilden die Zeit-Tiefen-Paare pro Intervall einen Trend, der in Abhängigkeit von stratigraphischer Überlast eine Zu- oder Abnahme der Geschwindigkeit aufzeigt. Ursachen für solche Ausreisser sind häufig unvollständige Intervalle, welche auf erosive Obergrenzen oder nicht durchbohrte Untergrenzen zurückzuführen sind. In Figur 5-5B werden die Zeit-Tiefen-Kurven für unterschiedliche Szenarien dargestellt. Die Bohrung links hat zwar eine vollständige Zeit-Tiefen-Kurve der mittleren Formation, diese ist jedoch am Top erodiert, und es fehlen wichtige Datenpunkte für ein regionales Geschwindigkeitsmodell. In der Bohrung rechts wurde die mittlere Formation nicht vollständig durchbohrt und an der oberen Formationsgrenze wurden keine Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Im Idealfall wurden Geschwindigkeitsmessungen über die ganze Formation aufgenommen, wie in der mittleren Bohrung dargestellt.

## Intervallgeschwindigkeitskarte

### GeoMol 17

(Isolinienintervall 200 m/s)

Dogger

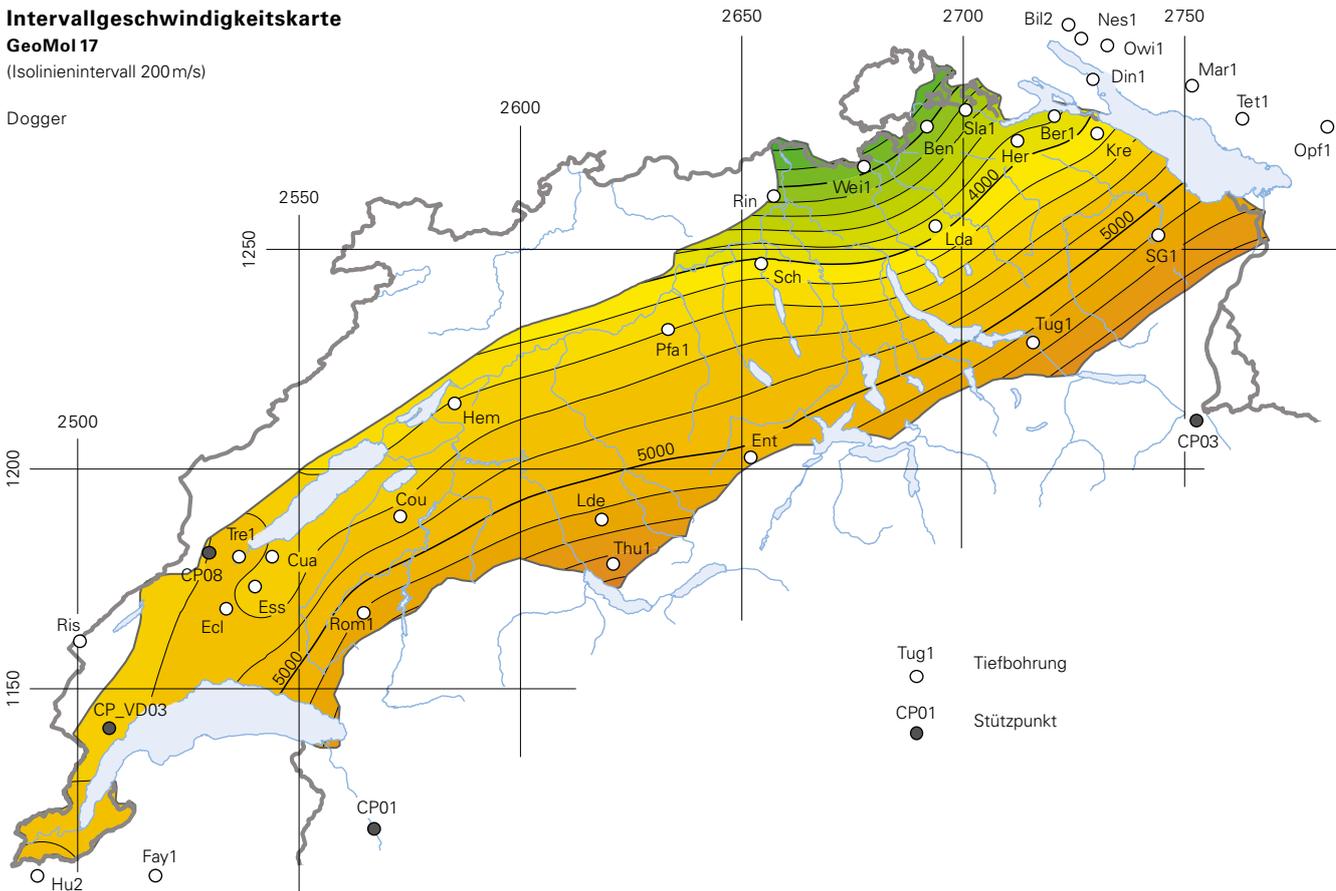


Fig. 5-4: Intervallgeschwindigkeitskarte (GeoMol17) des seismischen Intervalls Dogger mit Lokalisierung der Tiefbohrungen und Stützpunkte, deren Zeit-Tiefen-Werte in die Berechnung des Geschwindigkeitsrasters eingeflossen sind.

Konnte die Ursache für einen Ausreisser identifiziert werden, wurde dieser editiert. Nicht korrigierbare Zeit-Tiefen-Paare wurden aus der Datenbank entfernt. In einem nächsten Qualitätssicherungsschritt wurden die Zeit-Tiefen-Paare geplottet und visuell geprüft. Auch bei diesem Schritt sollten regionale Trends erkennbar sein und benachbarte Bohrungen keine unerklärlichen Widersprüche aufweisen. Eine Trendlinie liefert die mathematische Funktion für die Intervallgeschwindigkeit. Bedingt durch die geringe Datendichte mussten, wie bereits bei SOMMARUGA et al. (2012), synthetische Stützpunkte eingeführt werden. Hierzu wurden die von SOMMARUGA et al. (2012) definierten Stützpunkte weiterverwendet und, wo nötig, editiert. Weitere Stützpunkte wurden hinzugefügt. Bedingt durch die geringe Datendichte, müssen die Intervallgeschwindigkeiten als ein regionales und nicht als ein detailliertes Modell betrachtet werden.

Bei der Tiefenumwandlung können entweder die interpretierten Horizonte als Linien oder die aus den interpretierten Horizonten berechneten Flächen in Tiefe umgewandelt werden. Für das Teilmodell Landesgeologie tiefes Modell wurden die interpretierten Horizonte pro seismische Sektion als Linien in Tiefe umgewandelt. Im Gegensatz zur Umwandlung von geologischen Flächen hat diese Methode folgende Vorteile:

- Die hohe Datendichte entlang der seismischen Spur wird etwas länger im ganzen Bearbeitungsprozess beibehalten (ROTH et al. 2010).
- Rasterartefakte, die bei einer Umwandlung von Flächen entstehen, werden umgangen und damit entfällt ein Qualitätssicherungsschritt.

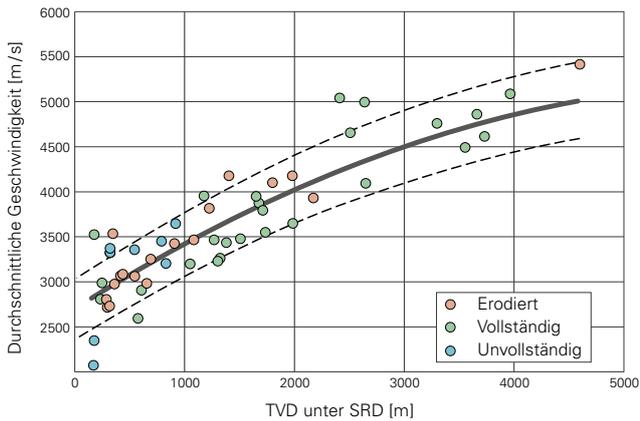
Generell kann ein Tiefenwert für einen Horizont an einem beliebigen Punkt nur dann mittels Intervallgeschwindigkeit berechnet werden, wenn der darüber liegende Horizont am gleichen Punkt vorhanden ist. Fehlende Punkte, sei es wegen Störungen, Fehlern oder Lücken in der Interpretation, wurden hinzugefügt um eine lückenlose Abfolge der Horizonte zu gewährleisten.

### 5.3.4.1 Isopachenkarten

Idealerweise bestätigt eine Isopachenkarte, was über die regionale Geologie bekannt ist; und laterale Änderungen der Formationsmächtigkeit sollten eine geologische Erklärung haben (Fig. 5-6). Abrupte Änderungen in den Mächtigkeiten weisen auf Artefakte und Fehler in den berechneten Mächtigkeiten der Horizonte hin. So ermöglichen Isopachenkarten eine Qualitätssicherung vor allem in Gegenden mit geringer Datendichte.

## Tiefenumwandlung

A Zeit-Tiefen-Paare



B Zeit-Tiefen-Kurven

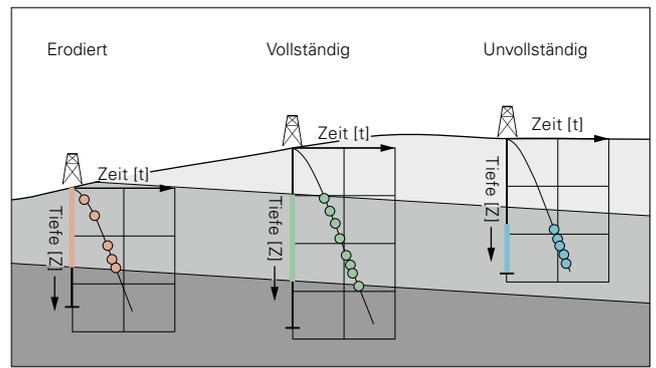


Fig. 5-5: Tiefenumwandlung. (A) Plot mit allen verfügbaren Zeit-Tiefen-Paaren des Horizonts Basis «Känozoikum», der Trendlinie (graue Linie) und deren Abweichung um 10% (gestrichelte Linie). (B) Darstellung von Zeit-Tiefen-Kurven in unterschiedlichen Szenarien.

## Mächtigkeit

Lias (TKeu - TLi)

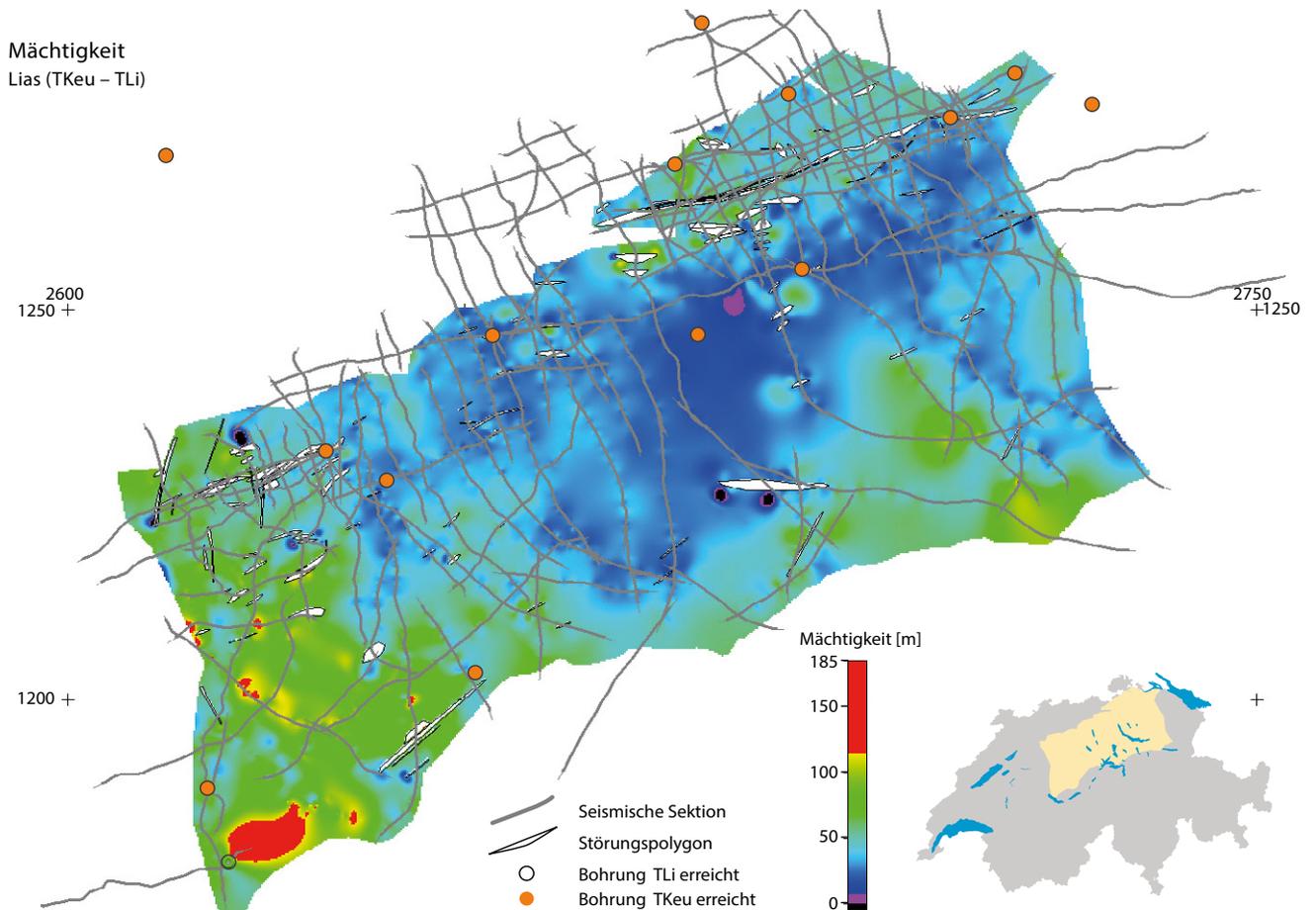


Fig. 5-6: Unkorrigierte Mächtigkeitsverteilung des Lias-Intervalls im Teilmodell Landesgeologie. Die abgebildete Mächtigkeit beruht auf der Interpretation seismischer Sektionen und Bohrdaten. Gut erkennbar sind Mächtigkeitschwankungen mit einem regionalen Trend im zentralen Gebiet, aber auch Ausreisser mit sehr geringer Mächtigkeit oder unrealistisch grosser Mächtigkeit. Im südwestlichen Bereich fällt ein Bereich mit Mächtigkeiten von 110 m und mehr auf. Bei genauerem Betrachten wird deutlich, dass nur ein kurzes Endstück einer seismischen Sektion für diese kegelförmige Mächtigkeitsanomalie verantwortlich ist. In diesem Fall waren Artefakte am Ende der seismischen Sektion verantwortlich für diese Anomalie. In anderen Fällen wurde die Interpretation nochmals überprüft, um die abweichenden Werte zu bestätigen oder zu verwerfen. Die Mächtigkeitsminima entstehen häufig im Zusammenhang mit Rasterartefakten an Störungspolygonen.

Zusätzlich heben Isopachenkarten auch Regionen mit zu geringer oder zu grosser Mächtigkeit hervor. Als zu geringe Mächtigkeit erachtet wurden Null-Mächtigkeiten und Mächtigkeiten, die geringer als 50% der geringsten aus den umliegenden Bohrungen bekannten Mächtigkeit sind. Mächtigkeiten, die 150% oder mehr der grössten bekannten Mächtigkeit aus umliegenden Bohrungen betragen, wurden auch näher untersucht. Konnte eine Mächtigkeitsanomalie in der Interpretation bestätigt werden, wurde diese beibehalten. In den meisten Fällen zeigte sich, dass sich die Anomalien auf Rasterungsartefakte in Gegenden mit geringer Datendichte zurückführen lassen.

Als Ursachen kommen ungenügend korrigierte Misties, komplexe Geometrien in der Nähe von Störungen oder auch Widersprüchlichkeiten in der Interpretation in Frage. Als Gegenmassnahme wurden Korrekturprofile generiert. Diese schneiden an beiden Enden interpretierte seismische Sektionen und bilden so ein zusätzliches, durch Seismik gestütztes Profil. Dazwischen werden die Stützpunkte so gesetzt, dass die jeweiligen Mächtigkeitstrends mit den an den Endpunkten beobachteten Mächtigkeiten übereinstimmen.

### 5.3.5 Horizontmodellierung

Die Vorgehensweise bei der Modellierung der Horizonte unterscheidet sich markant zwischen den verschiedenen Modelliergebieten. In einer allgemeinen Übersichtstabelle (Tab. 5-1) wird auf die verschiedenen Methoden zur Horizontmodellierung hingewiesen. In den folgenden Kapiteln werden hauptsächlich die verschiedenen Arbeitsschritte der Horizontmodellierung der Landesgeologie genauer beschrieben.

#### 5.3.5.1 Felsoberfläche

Bohrdaten, topographische Höhenlinien und Isohypsen der bereits bestehenden Felsoberflächenmodelle (s. a. Kap. 4.7) wurden in einem ersten Schritt zu einer ersten Felsoberfläche interpoliert. Daraus konnte ein erster Isoliniendatensatz über den möglichen Verlauf der Felsoberfläche mit einer Äquidistanz von 10 m flächendeckend über die ganze Schweiz generiert werden. Die Berechnung zur Erstellung der Felsoberfläche erfolgte in ArcGIS mit dem Werkzeug Topo-zu-Raster. Diese Interpolationsmethode ermöglichte die Verwendung von Shapefiles unterschiedlicher Geometrien (Punkt oder Linie).

Bei Abweichungen grösser als 10 m zwischen den berechneten Felsisohypsen und Bohrdaten wurden die Isolinen manuell korrigiert. Die Felsisohypsen wurden so angepasst, dass sie den Vorstellungen zum geologischen Verlauf der Felsoberfläche entsprechen. So wurden fluviatil entstandene Täler steil eingeschnitten gezeichnet, während für die grossen Gletschertäler runde Formen angenommen wurden. Grundsätzlich wurde so wenig wie möglich interpretiert und der Verlauf der Felsoberfläche vor allem auf vorhandene Daten abgestützt. Beispielsweise stützen sich die Maximaltiefen von Tälern ausschliesslich auf Bohrungen und auf die vorhandenen Modelle und nicht auf eine Interpretation der Neigung der Felsflanke.

Die grosse Herausforderung beim Konsistenzabgleich zwischen den verschiedenen Eingangsdaten lag in der Entscheidung, ob ein Fehler bei der Aufnahme der Bohrung vorliegt oder ob sich der Verlauf der Felsoberfläche plötzlich ändert und daher die Felsisohypsen angepasst werden müssen.

In einem letzten Arbeitsschritt wurden die korrigierten und angepassten Isohypsen zusammen mit den Bohrdaten mit der Interpolationsmethode Topo-zu-Raster in ArcGIS zu einer Fläche berechnet. Als Kontrolle wurde die interpolierte Felsoberfläche mit den Bohrungen, die bei ihrer Endtiefe den Fels nicht erreicht haben, verglichen.

#### 5.3.5.2 Molassehorizonte

Ähnlich wie bei der Modellierung der Felsoberfläche wurde für die Modellierung des TUSM-Horizonts zuerst ein erstes Horizont raster mit den verschiedenen Eingangsdaten berechnet. Für diese Interpolation in ArcGIS mit der Methode Topo-zu-Raster wurde eine einheitliche Ausbisslinie (s. a. Fig. 2-4), Bohrdaten, Tiefenwerte aus geologischen Profilen und die seismische Interpretation des TUSM-Horizonts verwendet. Isolinien dieses ersten Horizonts zeigen deutlich, dass die verschiedenen Eingangsdaten nicht aufeinander abgestimmt sind und sich teilweise sogar widersprechen (s. a. Fig. 5-7A).

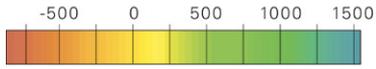
In einem zweiten Schritt wurden die Eingangsdaten überprüft und, falls notwendig, aussortiert. Die Harmonisierung der Ausbisslinie des USM/OMM-Kontakts basiert hauptsächlich auf den tektonischen Nebenkarten des GA25 im Massstab 1:200 000. Die Vereinfachung der Kontaktlinie hatte für die 3D-Modellierung grosse Auswirkungen vor allem bezüglich der Höhenangaben (z-Komponente), welche basierend auf swissALTI<sup>3D</sup> automatisch der Ausbisslinie zugeteilt wurde. Die Höhenangaben waren daher im Verhältnis zur vereinfachten Linie zu exakt dargestellt und führten deshalb zu einer fehlerhaften Interpolation entlang des erwarteten Kontakts. Für die Modellierung wurden aus diesem Grund einzelne, gesicherte Kontaktpunkte aus den verschiedenen GA25-Kartenblättern ausgewählt, um somit die Interpolation nicht unnötig einzuschränken. Die Tiefenangaben der Bohrdaten waren von unterschiedlicher Qualität und mussten im Vergleich mit benachbarten Datenpunkten evaluiert werden. Die Bestimmung der USM/OMM-Grenze in seismischen Daten erwies sich als schwierig, daher wurde bei der Modellierung des TUSM-Horizonts im Bereich der Zentral- und Nordostschweiz vor allem die seismische Interpretation der Nagra (ROTH et al. 2010) verwendet. Im Westen und im Süden des Molassebeckens wurde der seismische Datensatz mit einer eigenen Interpretation des TUSM-Horizonts ergänzt. Wie in Figur 5-7 gut erkennbar ist, wichen geologische Profile und seismische Interpretation teilweise stark voneinander ab. Aus diesem Grund wurden die geologischen Profile vor allem bei der Modellierung der untiefen Regionen am nördlichen Beckenrand für die Anbindung der modellierten Horizonte an die Ausbisslinien an der Oberfläche genutzt. Für die Modellierung im inneren Bereich des Molassebeckens wurden sie hingegen nicht verwendet.

Nach der Validierung der Eingangsdaten wurde eine Harmonisierung des heterogenen Datensatzes anhand von

# 1. Horizontberechnung des TUSM-Horizonts

Interpolation mit allen Eingangsdaten

- Eingangsdaten**
-  Seismische Interpretation
  -  geologische Profile
  -  harmonisierte Ausbisslinie
  -  Bohrdaten



Isohypsintervall 250 m

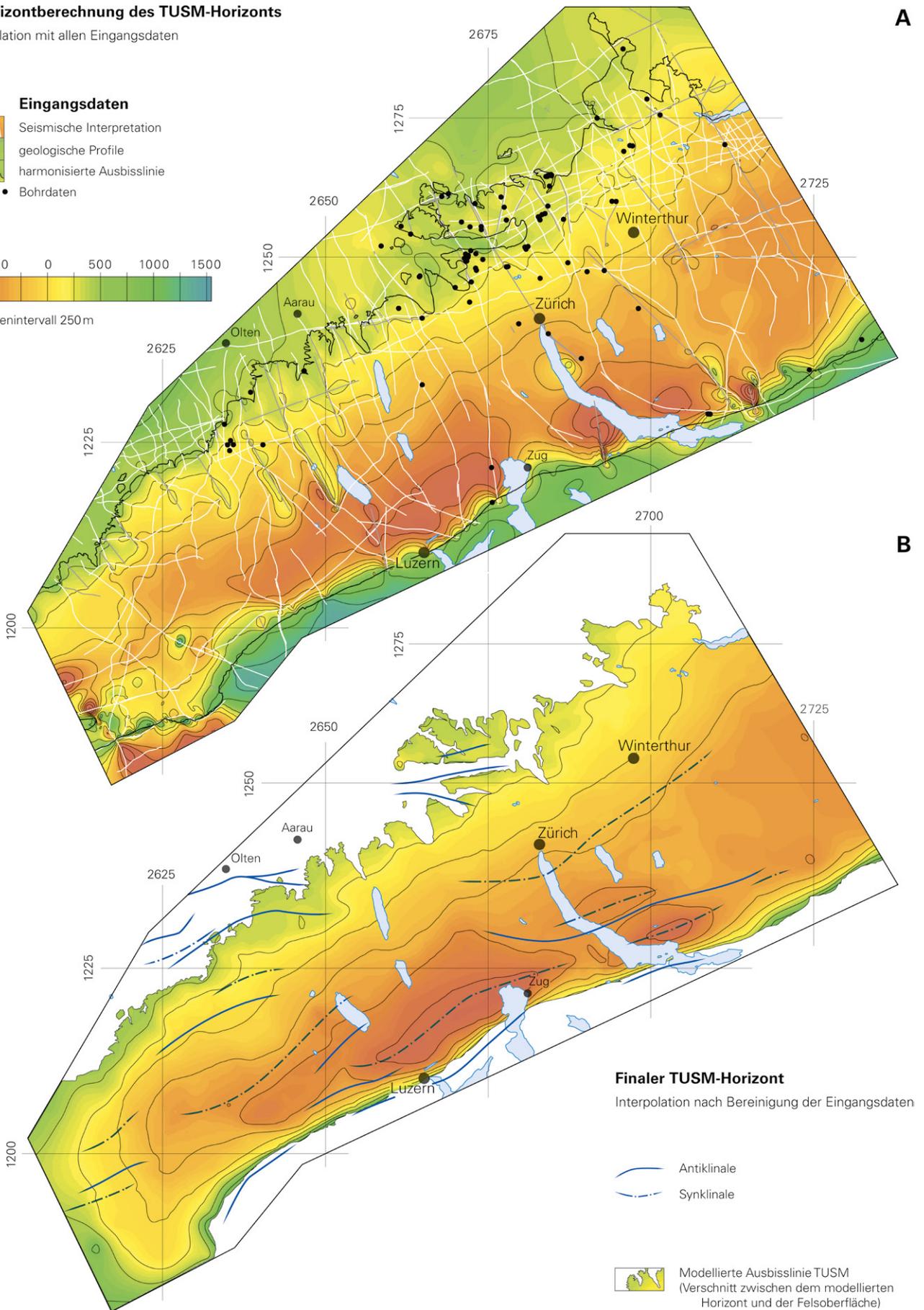


Fig. 5-7: TUSM-Horizontmodellierung. (A) zeigt die erste Horizontberechnung mit allen Eingangsdaten und (B) den finalen TUSM-Horizont nach der Bereinigung der Eingangsdaten. Dabei wurde die Interpolation mit Hilfsisohypsen und Stützprofilen unterstützt und kontrolliert.

zusätzlichen Hilfsisohypsen durchgeführt. Auf diese Weise konnten grossflächige geologische Strukturen in die Horizontberechnung miteinbezogen werden. Für die Erstellung dieser Hilfskonturen wurden einerseits die Tiefenangaben der oben genannten Eingangsdaten verwendet. Andererseits wurde im Bereich zwischen den Datenpunkten vor allem das Schicht-einfallen der Molasse-Einheiten an der Oberfläche (GA25) sowie Faltenachsen der harmonisierten Strukturkarte (Fig. 2-4) berücksichtigt. Zudem wurden im Raum Zug–Zürich–Winterthur die Isohypsenkarten des Küssnacher Bentonit-horizonts (GUBLER 2009, REY et al. 2011) zur Erkennung der wichtigsten Faltenstrukturen beachtet. Mit den korrigierten Eingangsdaten und den Hilfsisohypsen wurde anschliessend mit der gleichen Methode das finale TUSM-Horizont-raster berechnet (Fig. 5-7B).

Das Vorgehen bei der Modellierung des TOMM-Horizonts erfolgte auf gleiche Weise. Zur Kontrolle der Interpolation wurden mit der Modelliersoftware Move™ mehr als 50 Profile in NNW-SSE-Richtung im Abstand von 2,5 km und 12 Profile in WSW-ENE-Richtung im Abstand von 5 km erstellt. Auf diesen Profilen wurden die Schnittlinien der berechneten Horizonte TUSM und TOMM und die Eingangsdaten eingeblendet. So war es möglich, die Mächtigkeiten der modellierten Molasse-Einheiten zwischen den Eingangsdaten zu überprüfen und anzupassen. Gerade bei Interpolationen mit geologischen Strukturen (Falten) ist es wichtig, dass diese vertikal zwischen den modellierten Horizonten aufeinander abgestimmt sind.

### 5.3.5.3 Horizonte von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum»

Das Teilmodell der Landesgeologie wurde aufgrund der Anbindung des Modells an die Oberfläche und der unterschiedlichen Datengrundlagen in ein tiefes und zwei untiefe Modelle aufgeteilt. Dies hatte zur Folge, dass sich die Vorgehensweise bei der Modellierung in den einzelnen Landesgeologie-Teilmodellen teilweise stark unterscheidet.

#### 3D-Modellierung tiefes Modell

Die Datengrundlage des tiefen Modells besteht ausschliesslich aus seismischen Daten und Tiefbohrungen, die die geologischen Gegebenheiten im tiefen Untergrund sehr genau widerspiegeln. Die Aufbereitung der verwendeten Daten für das tiefe Modell der Landesgeologie wurde in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich behandelt (Kap. 5.3.2, Kap. 5.3.3 u. Kap. 5.3.4).

Allgemein bei der 3D-Modellierung, besonders aber bei der 3D-Modellierung des tiefen Modells sind die Horizont- und Störungsmodellierung eng miteinander verknüpft. Die Störungen fliessen indirekt in die Horizontmodellierung mit ein, da sie die Horizonte gegeneinander versetzen. In der Software Petrosys wurde eine erste Horizonttrasterung mit der Bicubic-Interpolationsmethode durchgeführt, mit der Störungspolygone ohne Tiefenwerte als Barriere in die Berechnung einbezogen wurden. Auf diese Weise entstand ein erstes Raster, das alle Störungen mit abschiebenden Versätzen darstellt. Für die Störungsmodellierung ist dieses erste Raster sehr bedeutend, denn dadurch lassen sich die Tiefenwerte der Störungspolygone der Abschiebungen bestimmen.

Für die Modellierung des Versatzes von Aufschiebungen, welche dazu führen können, dass ein und derselbe Horizont im Modell übereinander zu liegen kommt, mussten weitere Arbeitsschritte durchgeführt werden (s. a. Kap. 5.3.6.2). Der überschobene Bereich der Liegendescholle von Aufschiebungen wurde bei der ersten Rasterung nicht berechnet. Aus diesem Grund wurde ein zweites Raster erstellt, das sogenannte Basisraster, indem für alle Störungen vertikale Störungsversätze berechnet wurden. Dabei ging es in erster Linie darum, die Tiefenwerte der Störungspolygone von Aufschiebungen zu bestimmen. Mehr Information dazu, sowie eine Erklärung anhand eines Schemas, sind im Kapitel zur Tiefenumwandlung der Störungen (Kap. 5.3.6.2) aufgeführt.

In einer dritten Rasterung wurden die Störungspolygone mit Tiefenwerten in die Berechnung einbezogen. Dadurch entstand ein Horizonttraster mit genau definierten abschiebenden Versätzen. Anschliessend wurden die berechneten Raster mithilfe von Mächtigkeitskarten überprüft und wenn nötig mit Stützprofilen korrigiert.

Das bereinigte Raster wurde als Punktwolke in der Software Move™ zusammen mit den Störungspolygonen zu einer Oberfläche (Triangulated Irregular Network, TIN) umgewandelt. Dadurch entstand ein durchgehender Horizont, bei dem mithilfe der Störungspolygone die Fault Cut-outs ausgeschnitten werden mussten. Bei Aufschiebungen wurden im Überlagerungsbereich (Fig. 5-9, Fig. 5-10) jeweils zwei Horizont-Patches aus der Basislinie und der Toplinie des Störungspolygons erstellt, welche danach mit dem Horizont-Mesh zusammengefügt wurden. Auf diese Weise wurden im tiefen Modell der Landesgeologie Horizonte mit sowohl abschiebenden, als auch aufschiebenden Versätzen modelliert.

#### 3D-Modellierung untiefes Modell

Im untiefen Modell wurde die Störungsmodellierung vor der Horizontmodellierung durchgeführt. Die Störungsflächen geben auf diese Weise die Grundstruktur des Modells bereits vor. Um den Versatz entlang von Störungen in die Horizontmodellierung einzubringen, wurde das Modelliergebiet in mehrere Modellsegmente eingeteilt, so dass der liegende und der hangende Bereich unabhängig voneinander modelliert werden konnten. Erst in einem späteren Arbeitsschritt wurden die Modellsegmente zu einem einzigen Horizont zusammengefügt. Ähnlich wie bei der Modellierung der Molassehorizonte (Kap. 5.3.5.2) sind die Eingangsdaten für das untiefe Modell sehr heterogen. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass bei geologischen Profilen der Interpretationsspielraum unterschiedlich gross sein kann. Die verschiedenen Grundlagedaten mussten in einem ersten Schritt überprüft und aussortiert werden. Damit grossräumige Faltenstrukturen in die Horizontmodellierung einbezogen werden konnten, war es wichtig, die Horizontberechnung mit Hilfsisohypsen zu stützen. Diese Hilfslinien wurden zusammen mit den Tiefenwerten der geologischen Profile, der Höhenangabe der Ausbisslinie und den Bohrdaten mit dem Tool Topo-zu-Raster in ArcGIS zu einer Fläche interpoliert. Die modellierten Horizontsegmente wurden in Move™ an den

angrenzenden Störungen verschnitten und danach mit in dieser Software eingebauten Bearbeitungswerkzeugen zu einer einheitlichen Horizontfläche verbunden. Die Horizontmodellierung wurde mit Mächtigkeitkarten und regelmässigen Profilen in einem Abstand von 1 km überprüft und wenn nötig angepasst.

#### 5.3.5.4 Horizont Basis «Permokarbondrog»

Die Modellierung des Horizonts Basis «Permokarbondrog» konnte aufgrund der Datengrundlage (MADRITSCH et al. 2013, NAEF & MADRITSCH 2014) nur in der Nordschweiz durchgeführt werden. Das Vorgehen bei der Modellierung des Horizonts Basis «Permokarbondrog» unterscheidet sich von den anderen Herangehensweisen insofern, als dass keine zuverlässigen tiefenkonvertierten seismischen Interpretationen dieses Horizonts vorhanden sind. Daher lag der Hauptfokus bei der Modellierung auf der potenziellen Verbindung von Störungen, welche gemäss seismischen Interpretationen den Horizont Basis «Mesozoikum» versetzen, und den tiefer liegenden Störungen wie sie im Bereich an der Basis «Permokarbondrog» aus konzeptionellen Überlegungen heraus vermutet werden. Aus diesem Grund, war die «Synoptische tektonische Karte Top Kristallin» der Nagra (GREEN et al. 2013, NAEF & MADRITSCH 2014) die Hauptquelle für die Modellierung des Horizonts Basis «Permokarbondrog».

Für die Erstellung eines tiefenbasierten Störungs- und Horizontmodells muss die Tiefe des Basis-«Permokarbondrog»-Horizonts bekannt sein. Für die Tiefeninformation dieses Horizonts gibt es zwei mögliche Datenquellen. Einerseits konnte mit der gravimetrischen Vorwärtsmodellierung die Geometrie und auch die Mächtigkeit der Permokarbondröge in der Schweiz erkundet werden (ABDELFETTAH et al. 2014). Dazu dienten verschiedene gravimetrische Filterkarten sowie die Schwerekarte der Nagra (NAEF & MADRITSCH 2014, Beil. 4-1). Andererseits konnten Zweiweginterpretationskarten weiterhelfen, so die «Regionale Strukturkarte Nordschweiz: Basis Mesozoikum 1:100 000» (MADRITSCH et al. 2013, Beil. 6-5) und die «Isochronenkarte für den behelfsmässigen seismischen Horizont Top Kristallin im Bereich des zentralen Nordschweizer Permokarbondrogs» (NAEF & MADRITSCH 2014, Fig. 6-2). Damit wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 4500 m/s für die Sedimente des Permokarbondrogs errechnet und bei der Tiefen- umwandlung angewendet. Die resultierenden Mächtigkeit- werte wurden vom Basis-«Mesozoikum»-Horizont subtrahiert und so der Horizont Basis «Permokarbondrog» erstellt.

Mittels manueller Bearbeitung in der 3D-Modellierungssoftware konnten die Störungsversätze in die digitalen Horizonte eingefügt werden, so dass die Tiefe des Permokarbondrogs ziemlich genau der Tiefe aus dem Modell von ABDELFETTAH et al. (2014) entspricht. Dort, wo sowohl der Basis-«Permokarbondrog»-Horizont als auch der Basis-«Mesozoikum»-Horizont versetzt werden, wurde eine durchgehende Störungsfläche modelliert.

Aufgrund des beschriebenen Vorgehens sind die Störungen und vor allem die Tiefe des modellierten Nordschweizer Permokarbondrogs mit einer vergleichsweise grossen Unsicherheit behaftet. Das Modell des Permokarbondrogs darf deshalb nur zu Visualisierungszwecken genutzt werden.

### 5.3.6 Störungsmodellierung

#### 5.3.6.1 Störungsmodellierung im Vergleich

Die Modellierung von Störungen wurde von den verschiedenen Partnern unterschiedlich angegangen. Wesentliche Unterschiede finden sich in der Methodik, wie die interpretierten Störungen von Zeit in die Tiefe umgewandelt wurden. In der Zeitdomäne modellierte Störungen können je nach Software mit einem 3D-Raster in Tiefe konvertiert werden. Andere Partner benutzten die Schnittlinien zwischen Horizonten und einer Störung (Störungsspuren oder Störungspolygone), um die Geometrie der Störung von Zeit in die Tiefe umzuwandeln.

Weitere Unterschiede zeigen sich in der Art und Weise, wie der Versatz eines Horizonts an einer Störung modelliert wurde. Bei einigen Teilmodellen wurde der Horizont entlang einer Störung zwar versetzt, aber nicht unterbrochen. Bei anderen wurden die Horizonte mit der Störung oder mit 3D-Störungspolygonen verschnitten, so dass die versetzten Horizonte Aussparungen bei Störungen (Fault Cut-outs), aufzeigen. Die meisten Interpolationsmethoden können nicht mit doppelten Werten in der z-Richtung rechnen. Aus diesem Grund ist die Modellierung von Auf- oder Überschiebungen oft sehr aufwendig. In einigen Modelliergebieten wurde dieses Problem gelöst, indem das Gebiet in verschiedene Modellsegmente aufgeteilt wurde, um auf diese Weise das Hangende und das Liegende der Struktur separat zu modellieren und danach die Flächen mit der Störung zu verschneiden.

Tabelle 5-2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Arbeitsschritte der Störungsmodellierung in den einzelnen Teilmodellen. Dabei wird aufgeführt, welche Software für welche Arbeitsschritte benötigt wurde, wie die Störungen von Zeit in Tiefe umgewandelt wurden, wie die Störungen horizontal verlängert und wie der Versatz modelliert wurde.

Das folgende Kapitel geht detaillierter auf die Störungsmodellierung des tiefen Teilmodells Landesgeologie ein. Dort erfolgte die Störungsmodellierung zunächst in der Zeitdomäne. Anschliessend wurde die erarbeiteten Störungen tiefengewandelt und in der Tiefendomäne nachbearbeitet. Im untiefen Modell der Landesgeologie erfolgte die Störungsmodellierung ausschliesslich in der Tiefendomäne.

#### 5.3.6.2 Störungsmodellierung im tiefen Modell der Landesgeologie

##### *Störungspolygone*

Anhand von Störungspolygonen war es möglich, den Versatz der Störungen in die Horizontinterpolation einzubinden. In Figur 5-9 wird aufgezeigt, dass ein Störungspolygon der Schnittlinie zwischen einer Störung und einem Horizont entspricht. Auf diese Weise werden die räumliche Ausdehnung und der Versatz einer Störung genau definiert. Pro Horizont wurden Störungspolygone erstellt, indem jeweils die Schnittpunkte zwischen der Störung und dem Hangenden beziehungsweise dem Liegenden der Struktur über mehrere seismische Sektionen miteinander verbunden wurden. An den Störungsenden (Apexpunkt A, s. Fig. 5-8) laufen diese beiden Linien zusammen und bilden somit ein Störungspolygon.

Tab. 5-2: Überblick über die Vorgehensweise zur Modellierung von Störungen in den verschiedenen Teilmodellen. Ausführlicher wird die Methodik der Teilmodelle in den entsprechenden Arbeitsberichten beschrieben.

Teilmodelle	Genf	Waadt	Freiburg	Bern	Landesgeologie tiefes Modell	Landesgeologie untiefes Modell NW	Landesgeologie untiefes Modell NE	Bodensee
Anzahl Störungen	19	57	190	139	133	19	113	26
Störungsmodellierung in Zeit	ja	ja	ja	nein	nein			nein
Software	Petrel	IHS Kingdom	Move™	-	-	-	-	-
Bemerkung	Störung in 3D-Raster modelliert.	Störungspolygone wurden als Barriere bei Horizontmodellierung eingesetzt.	Störungsspuren wurden als Barriere bei Horizontmodellierung eingesetzt.	Störungspolygone wurden als Barriere bei Horizontmodellierung eingesetzt.	Störungspolygone wurden als Barriere bei Horizontmodellierung eingesetzt.			Störungspolygone wurden als Barriere bei Horizontmodellierung eingesetzt.
Tiefenumwandlung								
Software	Petrel	IHS Kingdom						IHS Kingdom
Methodik	Pillar Gridding	Dynamic Depth Conversion						
Bemerkungen	Tiefenumwandlung von Störungsflächen.	Tiefenumwandlung von Fault Sticks.	Störungsspuren wurden auf Horizonte in Tiefe projiziert.	Tiefenumwandlung von Fault Sticks.	Tiefenumwandlung mithilfe von Störungspolygonen.			Tiefenumwandlung mithilfe von Störungspolygonen.
Störungsmodellierung in Tiefe								
Software		IHS Kingdom, Move™	Move™		Move™	Move™	Move™	GoCAD
Bemerkungen		Basierend auf Fault-Sticks (in Zeit) und Störungspolygonen.	Basierend auf Störungsspuren.	Basierend auf Fault-Sticks (in Zeit) und Störungspolygonen.	Basierend auf Störungspolygonen.	Basierend auf Störungsisolinen zwischen Störungen aus geologischen Profilen.	Basierend auf Störungspolygonen.	Basierend auf Störungspolygonen.
Horizontale Verlängerung								
Methodik	keine	keine	Relativ zum Versatz, aber nicht Versatz-Längen-Verhältnis.	Versatz-Längen-Verhältnis pro Horizont.	Versatz-Längen-Verhältnis pro Horizont.	Versatz-Längen-verlängerung basierend auf geologischer Karte.	Versatz-Längen-Verhältnis.	Verlängerung um 500 m oder um ca. 1/3 der Länge.

Störungsenden	Vertikal abgeschnitten.	Vertikal abgeschnitten.	Vertikal abgeschnitten.	Abgerundet pro Horizont.	Elliptisch	Elliptisch	Abgerundet pro Horizont.	Elliptisch	Abgerundet pro Horizont.	Eckig, aber nicht vertikal abgeschnitten.
Versatzmodellierung										
Modellierung von Fault Cut-outs	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Bemerkung			Versatz als Stufe im Horizont.	Versatz als Stufe im Horizont.						
Modellierung von Aufschiebungen	nein	ja	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja

Mithilfe der Software Petrosys war es möglich, aus den Dehnungsbeträgen (Heave H, Fig. 5-8) der seismisch interpretierten Störungen erste Störungspolygone zu erstellen. Damit anhand der Dehnungsbeträge der minimale Versatz berechnet werden konnte ( $D_{\min}$  in Fig. 5-8B), war eine lokale Tiefenumwandlung der seismischen Interpretation basierend auf den nächsten drei Tiefbohrungen notwendig. Auf diese Weise konnten die Störungen in drei verschiedene Kategorien eingeteilt werden:

**Kategorie 1:** Der geringste minimale scheinbare Versatz, der auf einer seismischen Sektion interpretiert wurde, ist  $>80$  m UND die Störung kann über mehrere seismischen Sektionen verfolgt werden.

**Kategorie 2:** Der geringste minimale Versatz, der auf einer seismischen Sektion interpretiert wurde, ist  $>80$  m ODER die Störung kann über mehrere seismischen Sektionen verfolgt werden.

**Kategorie 3:** Der geringste minimale scheinbare Versatz, der auf einer seismischen Sektion interpretiert wurde ist  $<80$  m UND die Störung wurde nur auf einer seismischen Sektion interpretiert.

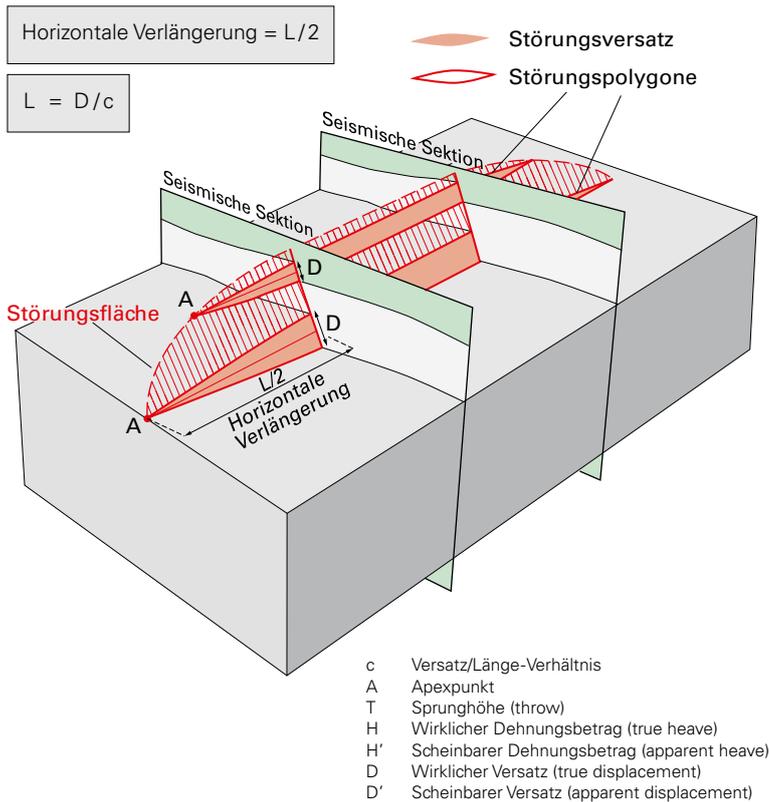
Bei Störungen, die mehrere Horizonte versetzen, galt der grösste Versatz eines Horizonts zur Einteilung in eine Kategorie. Für die horizontale Verlängerung der Störung über die seismische Sektion hinaus wurden die Störungspolygone der Kategorie 1 und 2 weiterverwendet. Kategorie 3 wurde für die Modellierung nicht mehr weiterverwendet.

Für die Verlängerung von Störungen über eine seismische Sektion hinaus wurde das allgemein anerkannte Potenzgesetz zwischen dem maximalen Versatz ( $D_{\max}$ ) und der Störungslänge (L) angewendet (WATTERSON 1986, WALSH & WATTERSON 1988, COWIE & SCHOLZ 1992, GILLESPIE et al. 1992, SCHULTZ & FOSSEN 2002, KIM & SANDERSON 2005, TORABI & BERG 2011).

Das Versatz/Längen Verhältnis (c) ist abhängig vom Gesteinstyp, der Störungsart (Aufschiebung, Abschiebung, Blattverschiebung) und der Störungsgrösse (cm bis km). Der Vergleich des Versatz-Längen-Verhältnisses von bekannten Störungen aus dem Molassebecken mit den Daten von TORABI & BERG (2011) ergab eine gute lineare Korrelation, woraus sich der Wert  $c = 0,05$  ableiten liess. Die Störungslänge konnte nun berechnet werden, indem der maximale Versatz durch c dividiert wurde. Die Verlängerung einer Störung abseits einer seismischen Sektion erfolgte in beide Richtungen jeweils um die Hälfte der berechneten Störungslänge.

Für die horizontale Verlängerung ist die genaue Kenntnis über den Versatz wesentlich. Da seismische Daten meistens nicht senkrecht zu den Strukturen orientiert sind, wird oft der scheinbare und nicht der wirkliche Versatz gemessen. Damit die Störungslänge nicht überschätzt wird, wurde der minimale Versatz (dip-slip) verwendet (Fig. 5-8). Entlang dem Streichen einer Störung befindet sich der maximale Versatz einer Störung in der Regel in Störungsmitte und nimmt zu den Störungsenden hin ab. Da die Lage der seismischen Sektion bezüglich der Störungsfläche unbekannt ist und diese in der Regel nicht genau der Mitte einer Störung

## A Störungsverlängerung



## B Minimaler Versatz

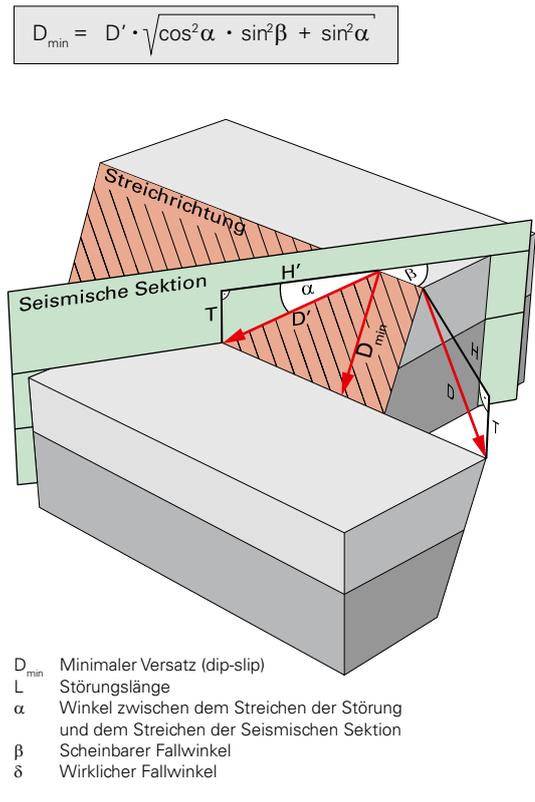


Fig. 5-8: Schematische Darstellung des Versatz-Länge-Verhältnisses zur Bestimmung der horizontalen Verlängerung einer Störung (A). Berechnung des minimalen Versatzes eines Horizonts an einer Störung (B).

liegt, muss davon ausgegangen werden, dass die hier berechneten Störungslängen tendenziell eher einem zu gering ausfallenden Wert entsprechen.

Es ist wichtig, die richtige Orientierung der Störung zu kennen, denn die Störungslänge ist abhängig vom wirklichen Dehnungsbetrag (H). Eine Änderung in der Orientierung der Störung verändert den Winkel  $\alpha$  zwischen dem Streichen der Störung und der Orientierung der seismischen Sektion und beeinflusst dadurch den scheinbaren Dehnungsbetrag (H') und folglich auch  $D_{\max}$  und in weiterer Folge die Störungslänge.

Die Orientierung von Störungen, die über mehrere seismische Sektionen verfolgt werden konnten, ergab die Verbindungslinie zwischen den seismischen Sektionen die Orientierung vor. Bei Störungen, die nur auf einer einzigen seismischen Sektion interpretiert werden konnten, wurde die Streichrichtung an diejenige des lokalen Störungstrends angepasst. Diese Information wurde sowohl geologischen Karten (GA25) als auch Strukturkarten des Untergrunds (MEIER 2010, NAEF & MADRITSCH 2014, ROTH et al. 2010) entnommen.

### Tiefenumwandlung der Störungen

Figur 5-9 zeigt eine Abschiebung und eine Aufschiebung in der Karten- sowie in der Profilansicht. Bei Aufschie-

bungen gibt es im Bereich des Störungspolygons eine Verdoppelung der Tiefenwerte eines Horizonts, erkennbar als grau schraffierte Fläche. Wegen dieses Überlagerungsbereichs wurden je nach Störungstyp zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Umwandlung der Störungspolygone in Tiefe angewendet.

In einem ersten Schritt wurden mit der Software Petrosys die Störungspolygone ohne Tiefenwerte als Barriere in eine erste Rasterberechnung miteinbezogen. Dadurch wurden die Horizonte im Bereich der Störungspolygone als Abschiebungen versetzt. Daraus liessen sich für Abschiebungen bereits die Fixpunkte zur Konstruktion des Störungspolygons in Tiefe bestimmen. Die genauen Tiefenangaben für das Top und die Basis einer Abschiebung ( $nt$  und  $nb$ , Fig. 5-10) sind bei einer seismischen Sektion in Tiefe bekannt. Die Tiefenwerte der Apexpunkte konnten direkt aus dem Rasterhorizont entnommen und somit mit diesen Fixpunkten das Störungspolygon in Tiefe konstruiert werden. Ein Resampling des Störungspolygons war notwendig, um bei einer zweiten Rasterung den Versatz entlang des Polygons genau zu steuern.

Für die Tiefenumwandlung der Störungspolygone von Aufschiebungen sind weitere Arbeitsschritte notwendig. Aus seismischen Daten konnten die Tiefenwerte der Tops von Aufschiebungen ( $rt$  in Fig. 5-10) bestimmt werden. Die Bestimmung der Tiefenwerte der Basis von Aufschiebung

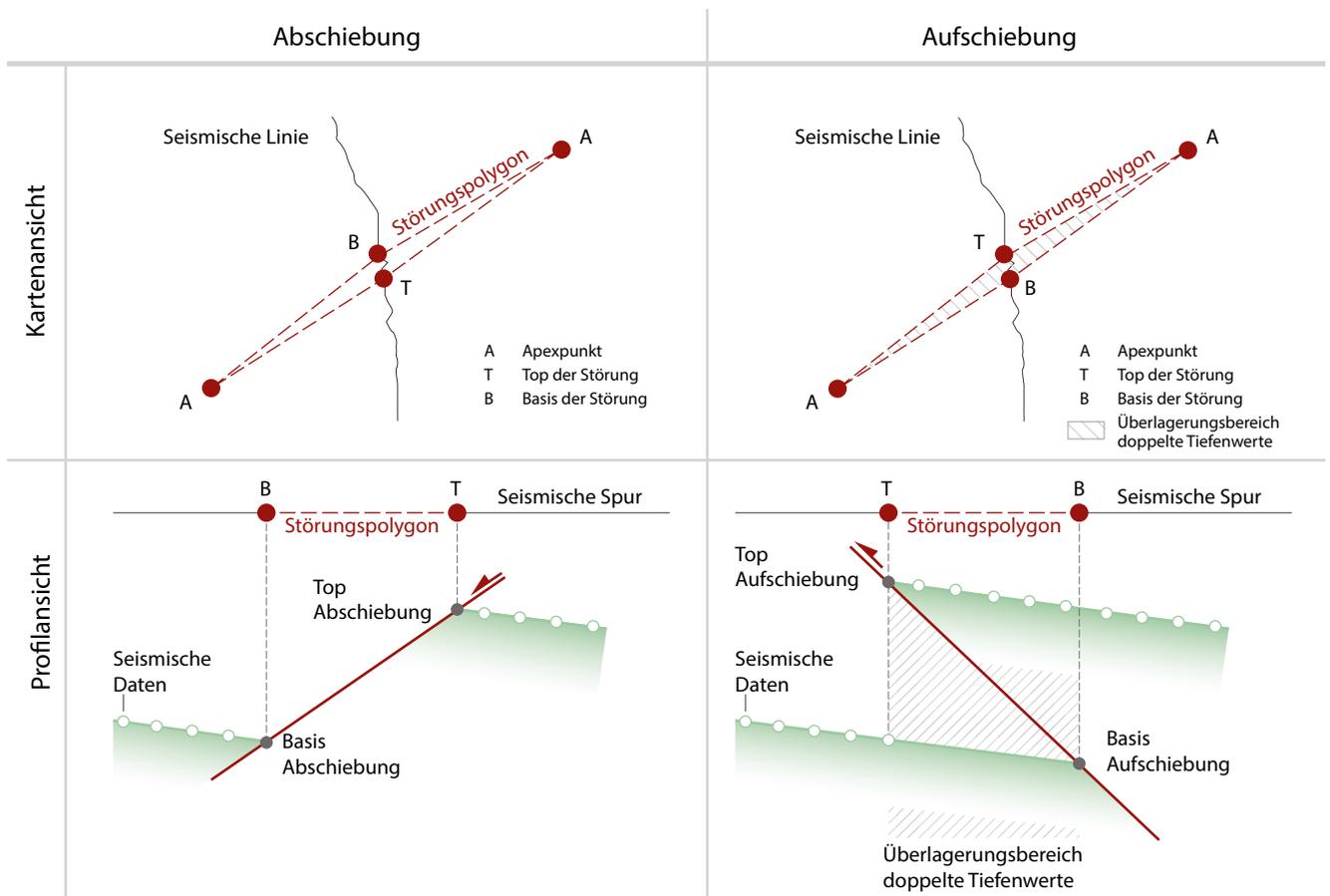


Fig. 5-9: Karten- und Profilsansicht von Störungspolygonen einer Auf- und einer Abschiebung. Die Fixpunkte Top der Störung (T), Basis der Störung (B) und zwei Apexpunkte definieren das Störungspolygon. Bei einer Aufschiebung entsteht ein Überlagerungsbereich mit doppelten Tiefenwerten.

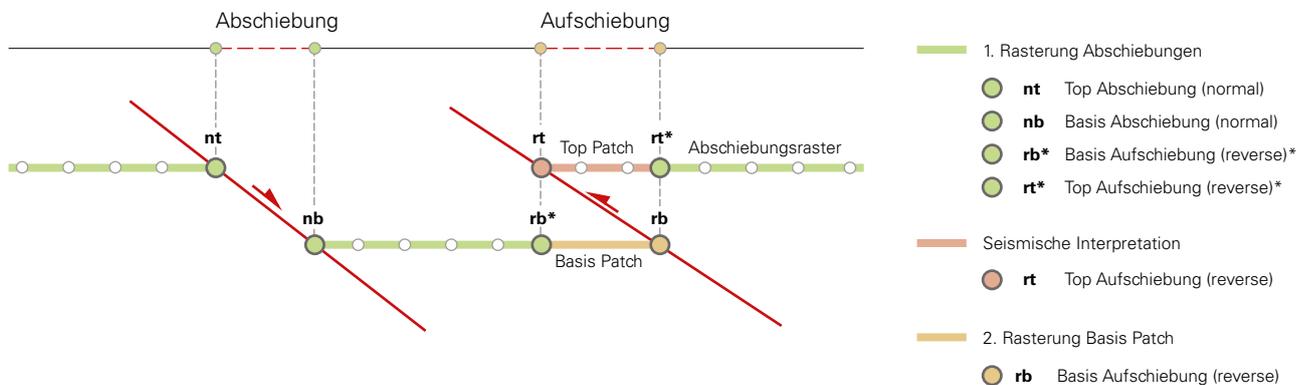


Fig. 5-10: Arbeitsschritte zur Bestimmung der Tiefenwerte für Störungspolygone einer Ab- und einer Aufschiebung. Bei einer ersten Rasterberechnung (hellgrün) können die Tiefenwerte der Fixpunkte für Abschiebungen (nt, nb) und die beiden Apexpunkte bestimmt werden. Aufschiebungen werden in diesem Arbeitsschritt wie Abschiebungen gerastert, daraus gehen die Punkte rb\* und rt\* hervor. Die Fixpunkte einer Aufschiebung (rt und rb) werden zum einen aus der seismischen Interpretation (rot) zum ändern aus einer 2. Rasterberechnung (gelb) bestimmt.

(rb in Fig. 5-10) konnte anhand einer zweiten Rasterung berechnet werden (Kap. 5.3.5.3). Hierzu wurden die seismischen Daten in Tiefe ohne die Werte des oberen Überlagerungsbereichs verwendet. Die Tiefenwerte der beiden Apexpunkte konnten aus dem ersten Horizontraster herausgelesen werden. Mithilfe von diesen Fixpunkten (rt, rb und A) konnten jetzt auch Störungspolygone für Aufschiebungen in Tiefe erstellt werden.

### Modellierung der Störungsflächen

Mit der Software Move™ wurden basierend auf Störungspolygonen, Fault Sticks und einer dreidimensionalen Aussenlinie eine Störungsfläche modelliert. Diese Störungsfläche wurde mit zusätzlich hinzugefügten Fault Sticks und Isolinien weiter verfeinert. Als Interpolationsmethode wurde die Delaunay-Triangulation verwendet, da diese Methode alle Eckpunkte (Vertex) exakt in die interpolierte Fläche

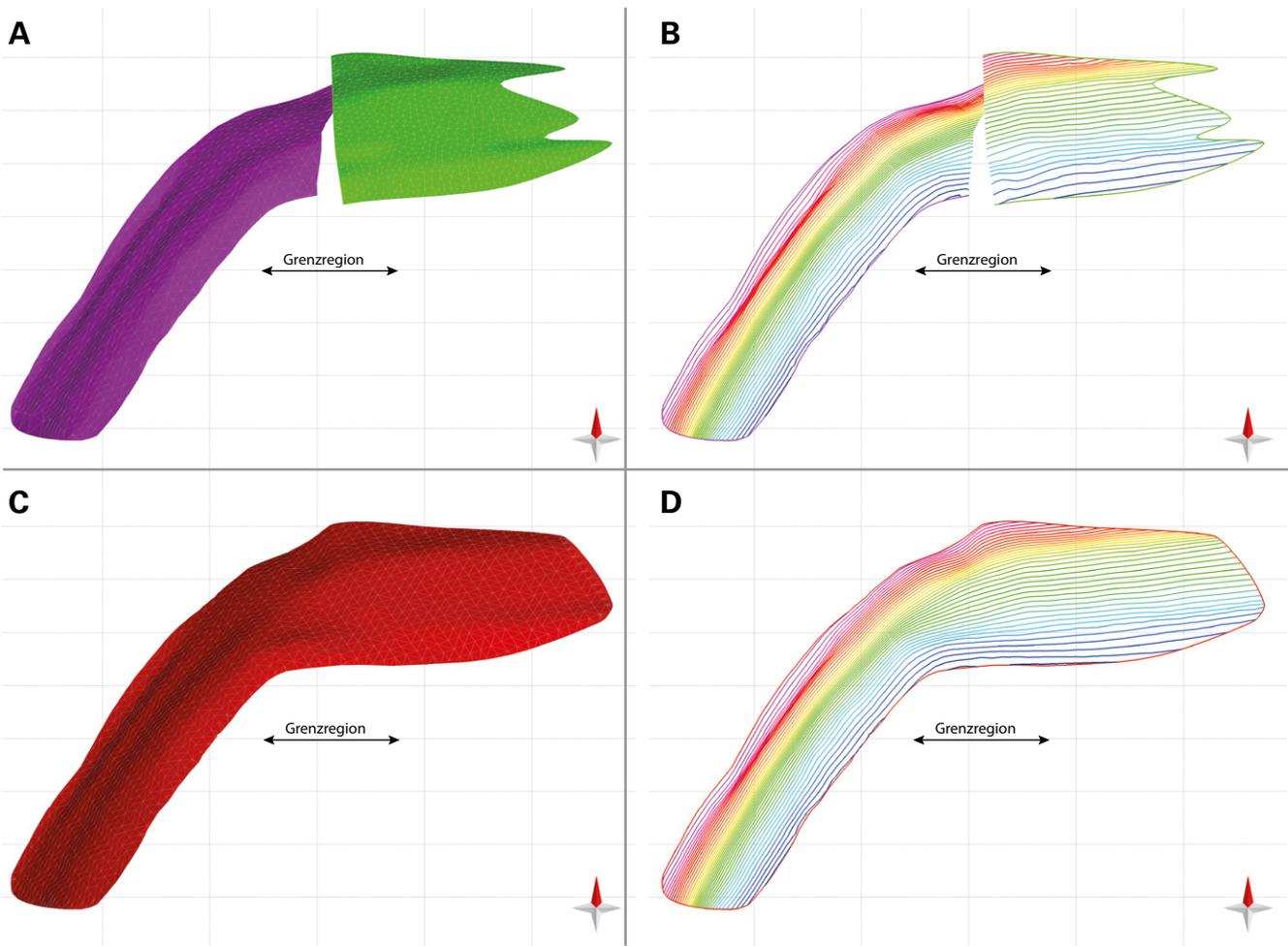


Fig. 5-11: Grenzabgleich einer Störungszone. Die Höhenunterschiede zwischen beiden Teilmodellen in der Lage der Störungszone sind sowohl in der Flächen- (A) als auch in der Isohypsenansicht (B) sichtbar. Die unterschiedlichen Störungsisohypsen wurden aufeinander angepasst, so dass zuletzt eine einzelne, harmonisierte Störungsfläche entsteht. C) Ansicht der Störungsfläche und D) Ansicht der Störungsisohypsen.

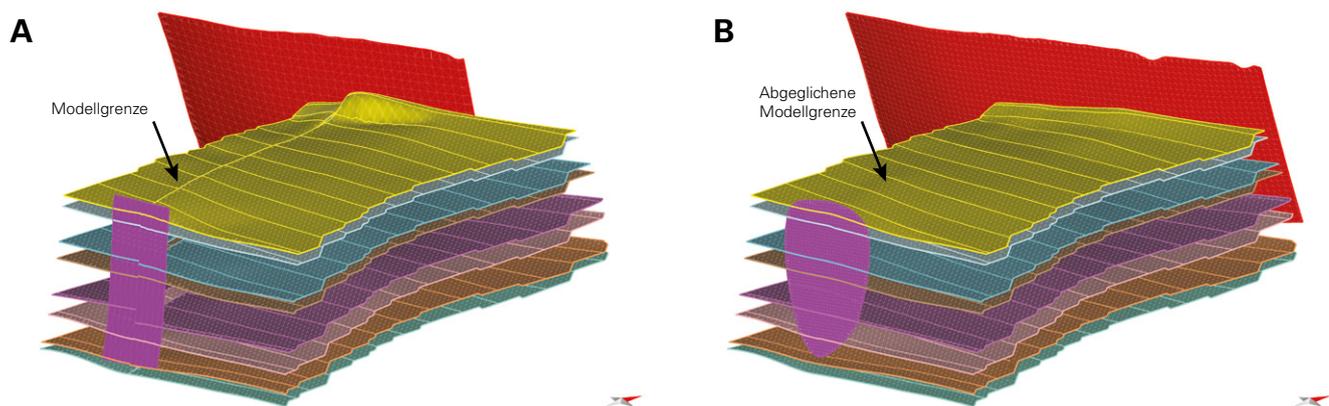


Fig. 5-12: Illustration der gegenseitigen Anpassung von Horizonten anhand von regelmässigen Profilen. A) Die Horizonte links und rechts der Modellgrenze stammten aus verschiedenen Teilmodellen und lagen auf verschiedenen Höhen. B) Die Horizonte links und rechts der Modellgrenze wurden angepasst und die bearbeiteten Horizonte konnten nun zusammengeführt werden.

einbindet. Auf diese Weise konnte mit den Eckpunkten der Störungspolygone, die sowohl in die Horizontberechnung, als auch in die Modellierung der Störung eingeflossen sind, ein «wasserdichter» Kontakt zwischen den Horizonten und der Störung garantiert werden.

### 5.3.7 Grenzabgleich der Teilmodelle

Wie einleitend beschrieben (Kap. 5.3.1) beruhen die Teilmodelle von GeoMol17 auf unterschiedlichen technischen Vorgehensweisen, Datengrundlagen und unterschiedlichen geologischen Konzepten. Trotz anfänglich definierten Rahmenbedingungen und der Festlegung von Überlagerungsbereichen zwischen den Teilmodellen, lassen sich die unterschiedlichen Arbeitsstile in den finalen Modellen noch immer deutlich erkennen. Damit GeoMol17 den Anspruch an ein zusammenhängendes, geologisch kohärentes und visuell homogenes geologisches 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens erfüllt, mussten die einzelnen Horizonte und Störungen der Teilmodelle aufeinander abgestimmt werden. Dafür wurde bereits vor Beginn der Modellierung zwischen den beteiligten Partnern eine geologisch sinnvolle

Grenzregion definiert (s. a. schraffierte Gebiete in Fig. 1-2), welche neben der festgelegten Modellgrenze auch eine Region links und rechts davon umfasst. In dieser Region haben die Partner über ihr Modellgebiet hinaus, zusätzlich im angrenzenden Gebiet des jeweils anderen Partners, gearbeitet. In den Grenzregionen wurden somit Störungen und Horizonte doppelt erstellt, welche als Grundlage für den Abgleich der Teilmodelle dienten.

Das Zusammenführen zweier unterschiedlich modellierten Störungsflächen im Grenzbereich erfolgte hauptsächlich, indem die Störungsisohypsen aufeinander abgestimmt wurden (Fig. 5-11). Anschliessend wurde mit den angepassten Störungsisohypsen eine neue, harmonisierte Störungsfläche erstellt.

Die Unterschiede zwischen den modellierten Horizonten zweier Teilmodelle wurden grösstenteils anhand von Profilschnitten korrigiert. Profile senkrecht zur Grenzlinie (Fig. 5-12) ermöglichen, einen sanften Übergang zwischen den Modellen herzustellen. Auf diese Weise war es möglich alle Horizonte gleichzeitig aufeinander abzustimmen, um so die innere Geometrie des Modells zu berücksichtigen (s. a. Kap. 6.2.3).

## 6. Resultate und Diskussion

### 6.1 GeoMol15

GeoMol15 umfasst die 3D-Modellierung von zehn geologischen Horizonten und den wichtigsten Störungszonen des Molassebeckens. Das Modell stützt sich grösstenteils auf die Datengrundlagen des SASMB. Als Verbesserung zum bereits bestehenden Modell des SASMB zählen die Angleichung der modellierten Horizonte an die Tiefbohrungen, die Anbindung an die Oberfläche, die Modellierung der Störungen (Kap. 6.1.1) und der Molassehorizonte (Kap. 6.1.2.2). Im Vergleich zum detaillierten Modell GeoMol17 bietet GeoMol15 vor allem den Vorteil eines einfachen, generellen Modells, das an den Modellgrenzen im Westen und in Osten an das europäische Modell angepasst wurde. Jedoch wurde die Grenzziehung des Modells im Norden entlang der Ausbisslinie von Basis «Känozoikum» gezogen, so dass geologisch komplexere Gebiete wie die Strukturen von Born und Lägern aus dem Modell ausgeschnitten wurden. Im Gebiet des Kantons Genf wurde GeoMol15 im Rahmen des Pilotmodells Genf-Savoyen vom geologischen Dienst Frankreichs (BRGM) und der Universität Genf erstellt.

Das durchgehende Schichtmodell GeoMol15 ist in Figur 6-1 mit Profilen und Blockmodellen so dargestellt, dass ein Einblick in das Innere des Modells ermöglicht wird. Zur besseren Visualisierung wurden die Volumen zwischen den modellierten Horizonten graphisch aufgefüllt. Die NW-SE ausgerichteten Profilansichten zeigen die lateralen Veränderungen von West nach Ost auf. Die zwei Profile A und B zeigen die zehn geologischen Horizonte und die angeschnittenen Störungen, die in GeoMol15 modelliert wurden. Die modellierten Horizonte von GeoMol15 verlaufen grösstenteils regelmässig und zeigen nur wenige durch die Modellierung hervorgerufene Mächtigkeitsschwankungen auf. Dies lässt sich hauptsächlich auf die Datengrundlage des SASMB zurückführen, bei dem die Unebenheiten der Interpolation in einem letzten Bearbeitungsschritt ausgeglättet wurden.

Im Gegensatz zu GeoMol17 (Kap. 6.2) wurden in GeoMol15 sowohl die Horizonte als auch die Störungszonen stark vereinfacht modelliert. Dies äussert sich beispielsweise darin, dass die Horizonte an den Störungen nicht versetzt werden oder Störungszonen, welche sich aus mehreren Teilstörungen zusammensetzen, nur als eine einzige Fläche dargestellt werden.

#### *Profil A*

Das annähernd 50 km lange NW-SE streichende Profil A (Fig. 6-1) erstreckt sich von Biel über Bern bis nach Thun und zeigt die typische keilförmige Struktur des Molassebeckens mit Molasse-Einheiten, deren Mächtigkeit in Rich-

tung NW-SE von 500 m auf bis zu 5000 m zunimmt. Die Sedimente der Kreide, die im Schweizer Molassebecken von etwa 300 m bei Genf (Fig. 6-5) in nordöstlicher Richtung auf 0 m Mächtigkeit zurückgehen, werden im Profil A (Fig. 6-1) gerade noch angeschnitten. Östlich von Biel und dem Aaretal verschwinden die Sedimente der Kreide und werden im restlichen Molassebecken nicht mehr angetroffen (Profil B). Im Norden des Profils sind beim Jäissberg die Mörigen-Antiklinale und drei vereinfachte Störungen der Hermrigen-Struktur erkennbar. Hier wird deutlich sichtbar, dass bei der Erstellung von GeoMol15 auf die Modellierung von versetzten Horizonten an Störungen verzichtet wurde. Im Süden wird die Hauptüberschiebung der subalpinen Molasse im Profil angeschnitten. Südlich davon wurden bei der Modellierung die Molasse-Einheiten nicht mehr weiter unterschieden.

#### *Profil B*

Das beinahe 60 km lange NW-SE-orientierte Profil B (Fig. 6-1) erstreckt sich im Norden von Rekingen über die Lägern, Zürich, entlang des Zürichsees bis nach Einsiedeln im Süden. Dieses Profil gibt einen Modelleinblick in das östliche Modelliergebiet von GeoMol15. Es ist gut erkennbar, dass die Mächtigkeit der mesozoischen Sedimente im Vergleich zum Profil im Westen (Profil A, Fig. 6-1) stark abgenommen hat.

Das Profil durchquert die Stadel-Irchel-Störungszone und bei der Lägern die Jurahauptüberschiebung. Diese komplexen Strukturen wurden in GeoMol15 bewusst sehr einfach modelliert. Die Stadel-Irchel-Struktur wurde als eine einzige Fläche dargestellt, als eine nach Nordwesten gerichtete Überschiebung im Westen (Profil B, Fig. 6-1) und als eine nach Nordwesten gerichtete Abschiebung im Osten. Die Jurahauptüberschiebung wurde als Störungsfläche zwar modelliert, die Modellierung der Horizonte bei der Lägern-Antiklinale wurde bei GeoMol15 hingegen nicht durchgeführt. Im Süden des Profils wird die Triangelzone angeschnitten (Kap. 6.1.1)

### 6.1.1 Störungen

Im Rahmen von GeoMol15 wurden die wichtigsten Störungszonen basierend auf den Interpretationen des SASMB modelliert. Als Ausgangslage für die Auswahl der Störungszonen dienten die «simplified faults» des SASMB (ENGLER & SOMMARUGA 2013). Diese entsprechen den Hauptstörungen, die sowohl in der Seismik, als auch auf der tektonischen Karte der Schweiz interpretiert wurden. Basierend auf verschiedenen Kriterien bezüglich der Datentreue, der räumlichen Richtigkeit und der allgemeinen Bekanntheit der interpretierten Störungszonen wurden achtzehn Störungszonen

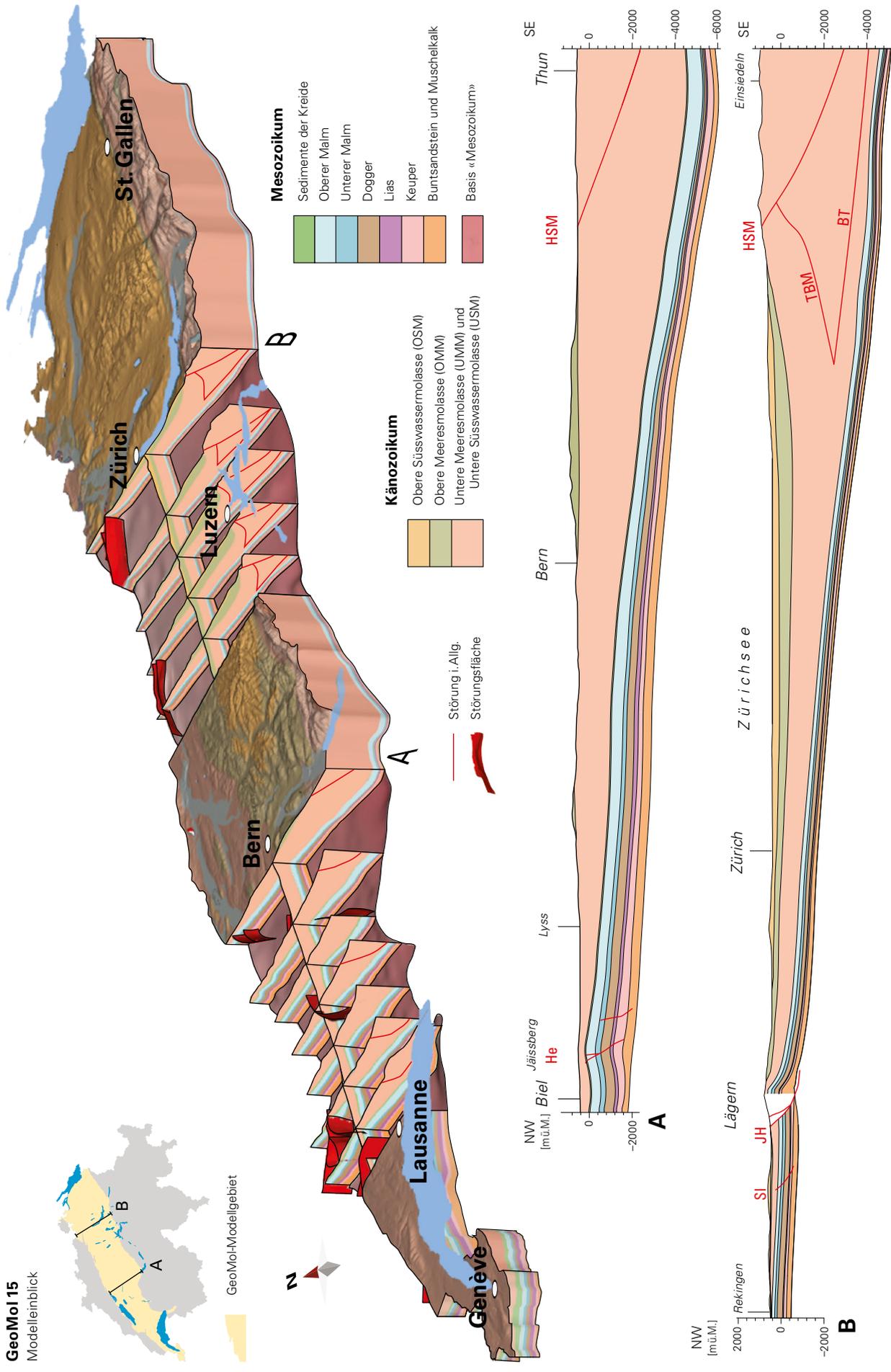


Fig. 6-1: Einblick in GeoMol15. Modellblöcke und Profilschnitte durch GeoMol15 zeigen den inneren Aufbau des Modells bei zweifacher Überhöhung. Profil A und Profil B zeigen den einfachen Charakter von GeoMol15. Die wichtigsten Störungszonen wurden stark vereinfacht und ohne Versatz der Schichtgrenzen modelliert. Modellierte Störungszonen: BT=Basale Überschiebung der Triangelzone, He=Hemirigen, HSM= Hauptüberschiebung der subalpinen Molasse, JH=Juraüberschiebung, SI=Stadel-Irchel, TBM=Stadel-Irchel, TBM=Juraüberschiebung der mittelländischen Molasse.

ausgewählt (Fig. 6-2). Zusätzlich wurden die basale Überschiebung der subalpinen Molasse und die Störungen der Triangelzone als konzeptionelle Störungen eingebaut. Auf die Modellierung eines basalen Abscherhorizonts in den triassischen Sedimenten wurde verzichtet (s. a. Kap. 6.2.1.1). Es wurden somit nur die wichtigsten Störungsflächen modelliert und Horizonte werden an den Störungszonen nicht versetzt.

Die Strukturen des Molassebeckens unterscheiden sich deutlich von Südwesten nach Nordosten und vom Jurasüdfuss im Nordwesten bis in den Bereich der subalpinen Molasse im Südosten. Im Folgenden werden die wichtigsten modellierten Störungszonen von GeoMol15 von Westen nach Osten kurz beschrieben.

### **Westliches Molassebecken**

Im Westen des Molassebeckens dominieren hauptsächlich grossräumige, WNW-ESE-orientierte dextrale und N-S-orientierte sinistrale Blattverschiebungen, die zusammen ein konjugiertes Muster bilden. Sie versetzen oder begrenzen die NE-SE-orientierten Antiklinalstrukturen (Essertines-Störungszone, Fig. 6-2). In GeoMol15 wurden die meisten dieser Blattverschiebungen, mit Ausnahme der La-Sarraz-Störungszone, vereinfacht mit einer einzelnen Störungsfläche modelliert. Dies ist eine sehr starke Vereinfachung der komplexen Störungszonen, die sich oft durch breitere, stark zerklüftete Bereiche mit Auf- und Abschiebungsversätzen, so genannten Blumenstrukturen, auszeichnen.

Die La-Lance-Struktur, beschrieben in zahlreichen Publikationen (BERTSCHY 1958, MEIA 1966, GORIN et al. 2003, IBELE 2011), ist eine grossräumige WNW-ESE-orientierte, dextrale Blattverschiebung, die aufgrund ihrer Grösse und Bedeutung die Kriterien einer Störungszone von GeoMol15 erfüllen würde. Weil die Störungszone im SASMB vor allem wegen fehlenden seismischen Sektionen im Neuenburgersee nicht nachverfolgt werden konnte, ist sie in GeoMol15 bewusst nicht modelliert. Generell konnten steilstehende Blattverschiebungen mit geringem Versatz in seismischen Sektionen oft nur schlecht lokalisiert werden. Daher wurden weitere bekannte Blattverschiebungen, beispielsweise die NNW-SSE-orientierten, dextralen Blattverschiebungen der Aaretal- und der Gürbetal-Störungszone, in GeoMol15 nicht modelliert.

Im Gebiet von Freiburg wurden zwei N-S-orientierte sinistrale Störungsflächen modelliert, die zusammen die Fribourg-Zone östlich begrenzen. Auch hier handelt es sich um eine starke Vereinfachung einer komplexen Störungszone, bestehend aus einzelnen «en-échelon»-artig angeordneten Störungssegmenten (MEIER 2010, IBELE 2011, ABEDNEGO 2015, VOUILAMOZ et al. 2017). Mikroseismische Untersuchungen zeigten eine schwache seismische Aktivität entlang dieser Störungszone, die sich auf die oberen mesozoischen und die känozoischen Einheiten beschränkt (ABEDNEGO 2015, VOUILAMOZ 2015). Dieses sinistrale N-S-orientierte Störungssystem setzt sich nach Norden hin fort und geht in der Nähe von Hermrigen in eine SW-NE-orientierte, frontale Störungszone über (MEIER 2010). Die Mörigen-Antiklinale (Fig. 2-4) geht als Aufschiefungsfalte aus dieser nordvergenten Überschiebungsstruktur hervor. In GeoMol15 besteht die Hermrigen-Struktur aus drei individuellen Störungsflächen, die von Osten her gegen Westen in eine

einzelne N-S verlaufende, steilstehende Blattverschiebung übergehen (Fig. 6-2).

### **Zentrales Molassebecken**

Die Born-Engelberg-Störungszone (Fig. 2-4) setzt sich in GeoMol15 aus drei Störungsflächen zusammen, die WSW-ENE bis W-E streichen. Im westlichen Teil besteht die Struktur aus einer südvergenten Überschiebung, von der im östlichen Bereich zwei nordvergente Störungen abzweigen. Dadurch teilt sich östlich der Aare die Born-Engelberg-Antiklinale in zwei Gewölbe auf: die eigentliche Born-Engelberg-Antiklinale und die südlich dazu gelegene Kölliken-Antiklinale, Fig. 2-4). Im Gegensatz zu GeoMol17 (Kap. 6.2.1.3) wurden bei GeoMol15 die stratigraphischen Horizonte im Bereich der Born-Engelberg-Störungszone nicht modelliert. Das Gleiche gilt für die Jurahauptüberschiebung, bei der in GeoMol15 zwar eine Haupt- und eine abzweigende Nebenüberschiebung modelliert, die aufgefalteten Horizonte der Lägern-Antiklinale jedoch ausgeschnitten wurden.

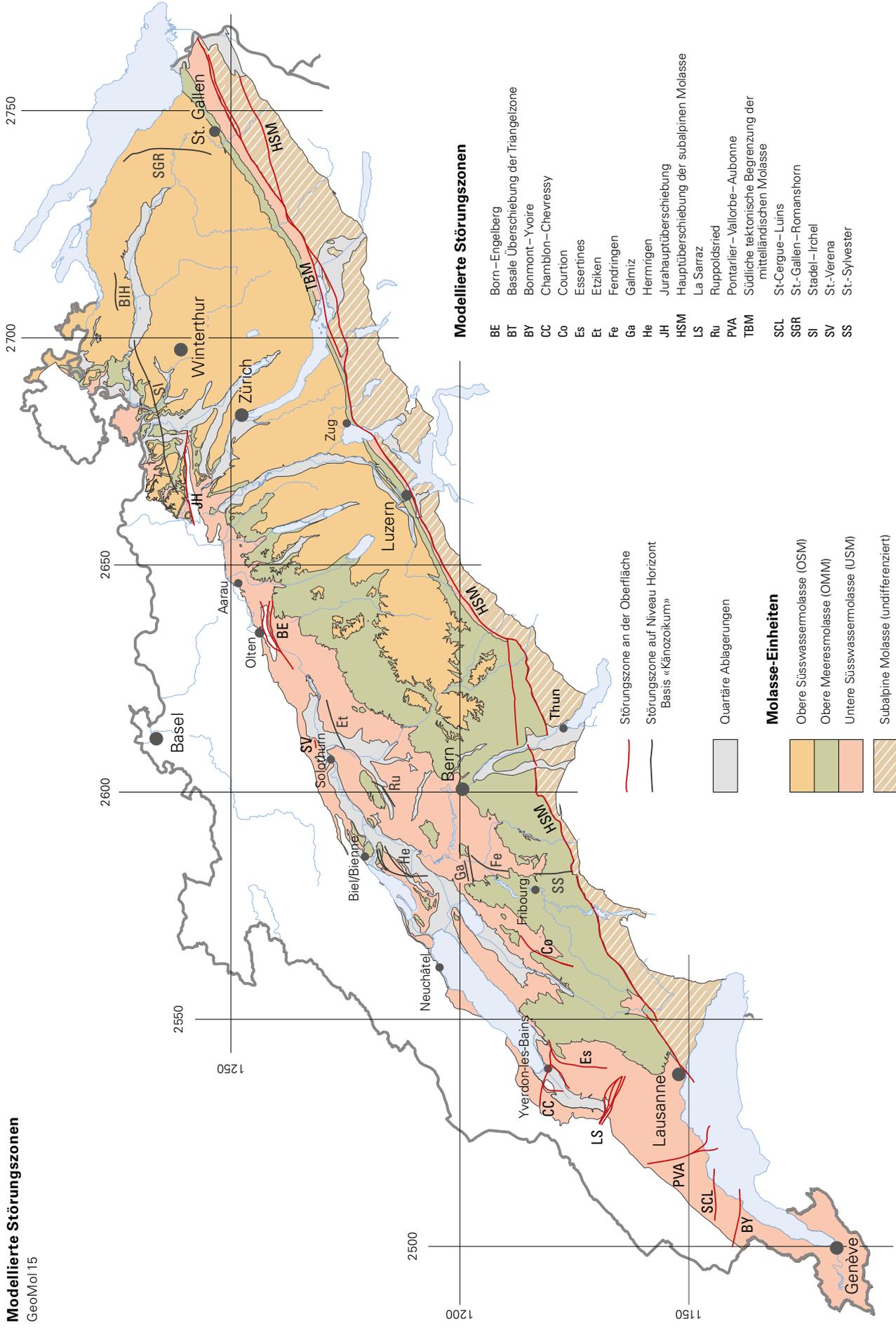
### **Östliches Molassebecken**

Das Baden-Irchel-Herdern-Lineament (NAGRA 2014, MALZ et al. 2016) erstreckt sich nördlich der Jurahauptüberschiebung über 60 km in Richtung ENE-WSW (Fig. 6-2) und entspricht vermutlich dem südlichen Trogrand des Nordschweizer Permokarbons (DIEBOLD 1991, NAEF et al. 1995, NAGRA 2008). Der östliche Bereich dieser grossräumigen Störungszone zeigt einen extensiven Charakter, der sich von der Grundgebirgsabschiebung über die mesozoischen Sedimente bis über die Basis «Känozoikum» hinaus fortsetzt. Richtung Westen wird der mesozoische Bereich dieser Abschiebungszone allmählich kompressiv überprägt (MADRITSCH et al. 2013). Da die Stadel-Irchel-Antiklinale sowohl nord- als auch südvergente Überschiebungen aufweist, wurde diese Struktur neu als «Fischschwanz»-Struktur interpretiert (MADRITSCH et al. 2013, MALZ et al. 2016). In GeoMol15 wurde das Baden-Irchel-Herdern-Lineament zusammen mit der Stadel-Irchel-Störungszone stark vereinfacht als eine einzige Störungsfläche modelliert: Im Westen als eine nordvergente Aufschiefung, die im Gebiet vom Irchel in eine gegen Norden einfallende Abschiebung übergeht. Im westlichen Bereich der Störungszone reicht die modellierte Störungsfläche bis in die triassischen Sedimente, im Osten reicht die Störungsfläche bis unter Basis «Mesozoikum».

Südlich des Bodensees befindet sich die St.-Gallen-Romanshorn-Störungszone, ein NNE-SSW streichendes, abschiebendes Störungssystem. Die strukturelle Interpretation eines neuen 3D-Seismikdatensatz hat eine mehrphasige Störungszone aufgezeigt (HEUBERGER et al. 2016). In GeoMol15 jedoch wurde diese Störungszone basierend auf den Interpretationen des SASMB auf eine einzige Störungsfläche reduziert, die sich im Norden in Richtung NW-SE dreht und gegen Nordosten einfällt.

Im Süden des Modellgebiets wurde der Schwerpunkt auf die äusserste Zone der subalpinen Molasse gesetzt, einer strukturellen Übergangszone, die von nordwestvergenten, steilstehenden Überschiebungen geprägt ist. Östlich des Aaretals bis nach Süddeutschland und Österreich bilden südostvergente Rücküberschiebungen zusammen mit der Hauptüberschiebung der subalpinen Molasse die

**Modellierte Störungszonen**  
GeoMol15



**Modellierte Störungszonen**

- BE Born-Engelberg
- BT Basale Überschiebung der Triangelzone
- BY Bonmont-Yvoire
- CC Chamblon-Chevressy
- Co Courtion
- Es Essertines
- Et Etziken
- Fe Fendringen
- Ga Galmiz
- He Hermitgen
- JH Jura Hauptüberschiebung
- HSM Hauptüberschiebung der subalpinen Molasse
- LS La Sarraz
- Ru Ruppoldsried
- PVA Pontarlier-Vallorbe-Aubonne
- TBM Südliche tektonische Begrenzung der mittelländischen Molasse
- SCL St-Cergue-Luins
- SGR St-Gallen-Romanshorn
- SI Stadel-Irchel
- SV St-Verena
- SS St-Sylvester

- Störungszone an der Oberfläche
- Störungszone auf Niveau Horizont Basis « Känozoikum »

Quartäre Ablagerungen

**Molasse-Einheiten**

- Obere Süswassermolasse (OSM)
- Obere Meeresmolasse (OMM)
- Untere Süswassermolasse (USM)
- Subalpine Molasse (undifferenziert)

Fig. 6-2: Übersicht der modellierten Störungszonen in GeoMol15.

## Modellierte Störungszonen

Triangelzone

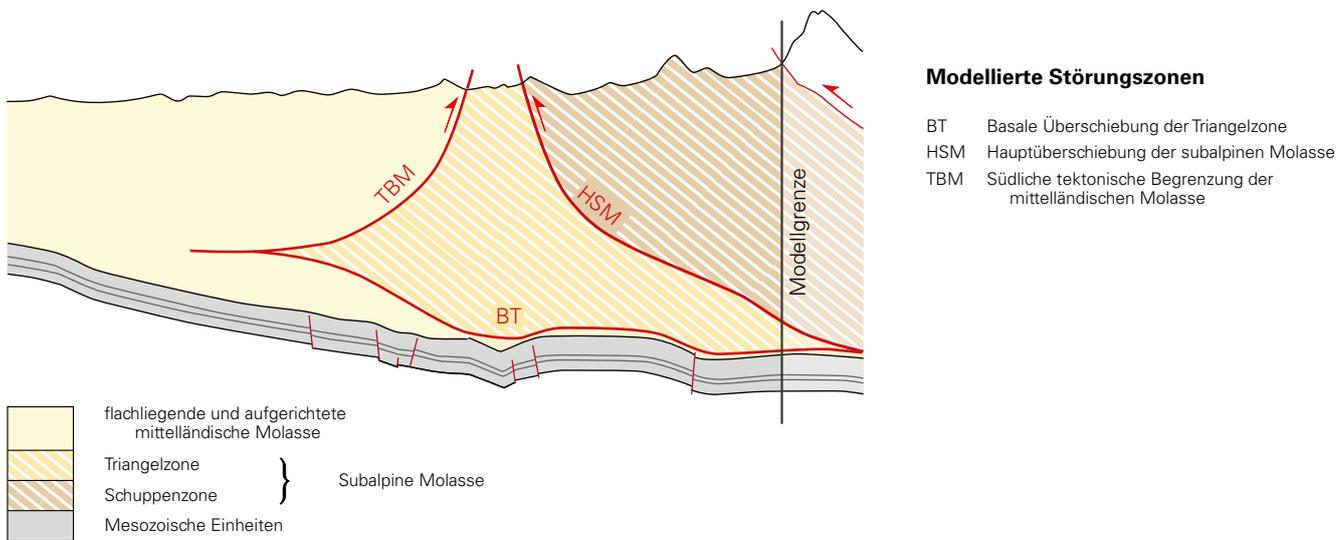


Fig. 6-3: Schematische Darstellung der Triangelzone und der konzeptionell modellierten Störungszonen.

Triangelzone (Fig. 6-2 u. Fig. 6-3). Die Modellierung der Hauptüberschiebung der mittelländischen Molasse und der tektonischen Begrenzung der subalpinen Molasse wurden als durchgehende SW-NE streichende Störungsflächen modelliert. Die komplexe tektonische Architektur der Triangelzone mit durchbrochenen Faltenzügen, überkippten Schichten und verschuppten Gesteinspaketen (BACHMANN et al. 1982, PFIFFNER 2009, SCHLUNEGGER et al. 2016, SOMMARUGA et al. 2012, VOLLMAYR 1992, VOLLMAYR & WENDT 1987) wurde für GeoMol15 und GeoMol17 sehr stark vereinfacht und beschränkt sich auf die in Figur 6-3 aufgeführten Störungen. Dabei stützt sich die Modellierung dieser drei Störungszonen vor allem auf die Karten des GA25 und in den tieferen Bereich auf die Transekte des SASMB (s. a. Kap. 5.2.5.2).

### 6.1.2 Horizonte

Im Rahmen von GeoMol wurden 10 geologische Horizonte basierend auf den Interpretationen des SASMB modelliert. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die modellierten Horizonte von GeoMol15 von den Resultaten von SOMMARUGA et al. (2012) nur unwesentlich. Unterschiede finden sich hauptsächlich im oberflächennahen Bereich. Zudem wurden bei GeoMol15 zusätzlich die Horizonte der Felsoberfläche und der Molasse-Einheiten modelliert.

#### 6.1.2.1 Felsoberfläche

Die modellierte Felsoberfläche von GeoMol15 wurde zusammen mit GeoMol17 modelliert und unterscheidet sich lediglich in ihrem Detaillierungsgrad. Aus diesem Grund werden die Resultate hier nicht weiter beschrieben, sondern auf die ausführlichere Beschreibung der Felsoberfläche von GeoMol17 (Kap. 6.2.2.1) verwiesen.

#### 6.1.2.2 Molassehorizonte

Anders als beim Modell des SASMB wurden bei GeoMol15 zusätzlich die zwei Molassehorizonte Top USM und Top OMM modelliert. Die Gesamtmächtigkeit der Molassesedimente zwischen Basis «Känozoikum» und der Felsoberfläche ist in Figur 6-4 abgebildet. Deutlich erkennbar ist eine keilförmige Mächtigkeitszunahme der Molassesedimente in Richtung Südosten von 0m südlich des Juras bis zu mehr als 5500m im Bereich der subalpiner Molasse (weiss schraffiert in Fig. 6-4). Die Isopachen der känozoischen Horizonte verlaufen regelmässig von Südwesten nach Nordosten. Die kleineren, lokalen Schwankungen hängen mit grösseren Vertiefungen der Felsoberfläche zusammen.

#### 6.1.2.3 Mesozoische Horizonte

Die modellierten Horizonte von Basis «Känozoikum» bis zu Basis «Mesozoikum» stützen sich hauptsächlich auf seismische Daten, welche in Tiefbohrungen eingehängt sind. Im Vergleich zu den modellierten Horizonten des SASMB (SOMMARUGA et al. 2012) wurde bei GeoMol15 der Schwerpunkt auf die Verbindung der seismischen Interpretation mit der Geologie an der Oberfläche und ein exaktes Einpassen der modellierten Horizonte an die Tiefbohrungen gesetzt. Die meisten Anpassungen wurden im Basis-«Känozoikum»-Horizont vorgenommen, in dem die modellierten Horizonte an die geologischen Profile und die Ausbisslinie (GA25) angeglichen wurden. Die darunterliegenden Horizonte folgen unter Berücksichtigung ihrer Mächtigkeit (SASMB) den Strukturen des Horizonts Basis «Känozoikum».

Die mesozoischen Einheiten setzen sich aus 0–400m mächtigen kretazischen Sedimenten, 800m bis 2000m mächtigen jurassischen und 150–800m mächtigen triassischen Sedimenten zusammen. Auf die Beschreibung der Tiefenlage und die Mächtigkeit der einzelnen Horizonte

### Mächtigkeitkarte

Känozoische Sedimente GeoMol 15

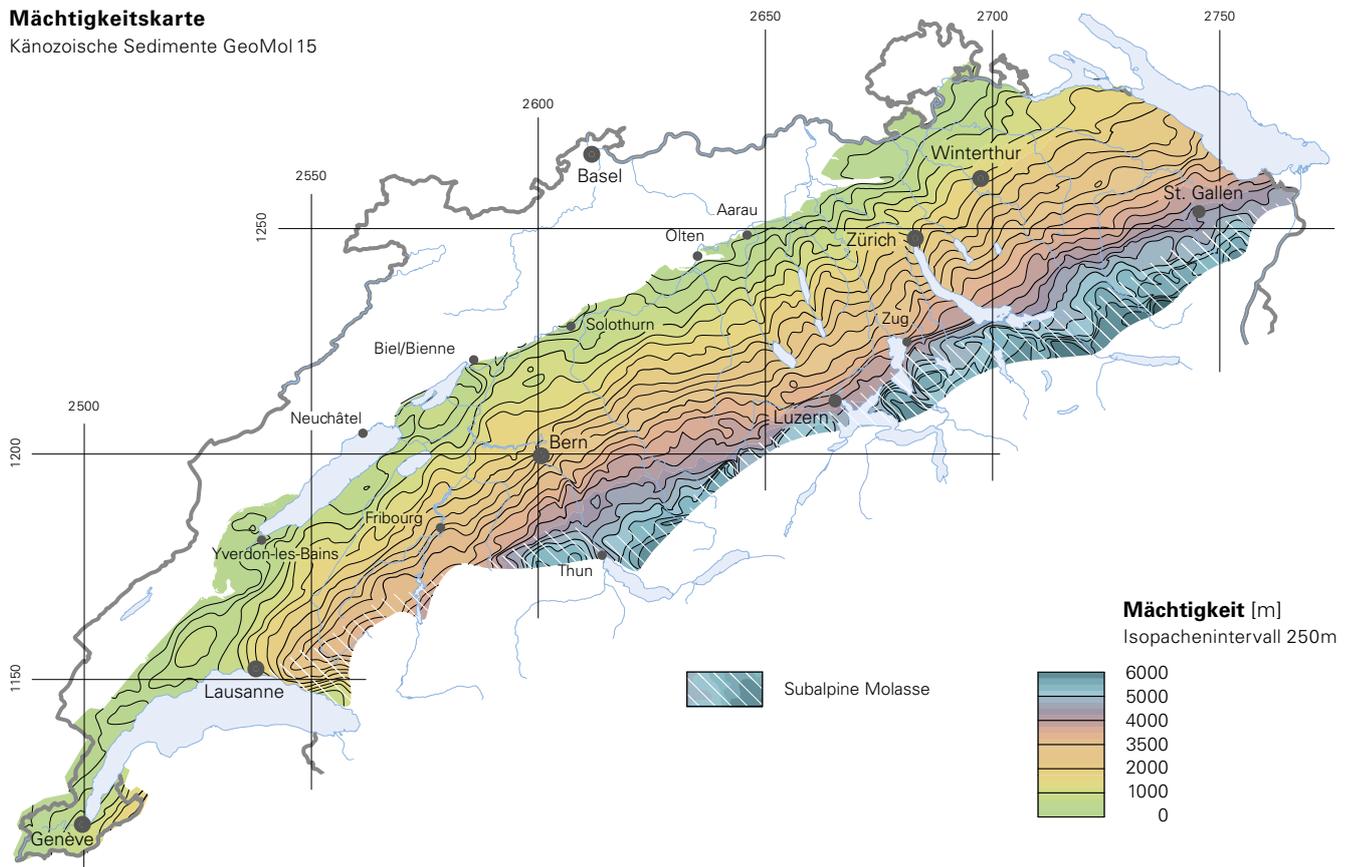


Fig. 6-4: Mächtigkeitkarte der känozoischen Sedimente von GeoMol15.

### Mächtigkeitkarte

Mesozoische Sedimente GeoMol 15

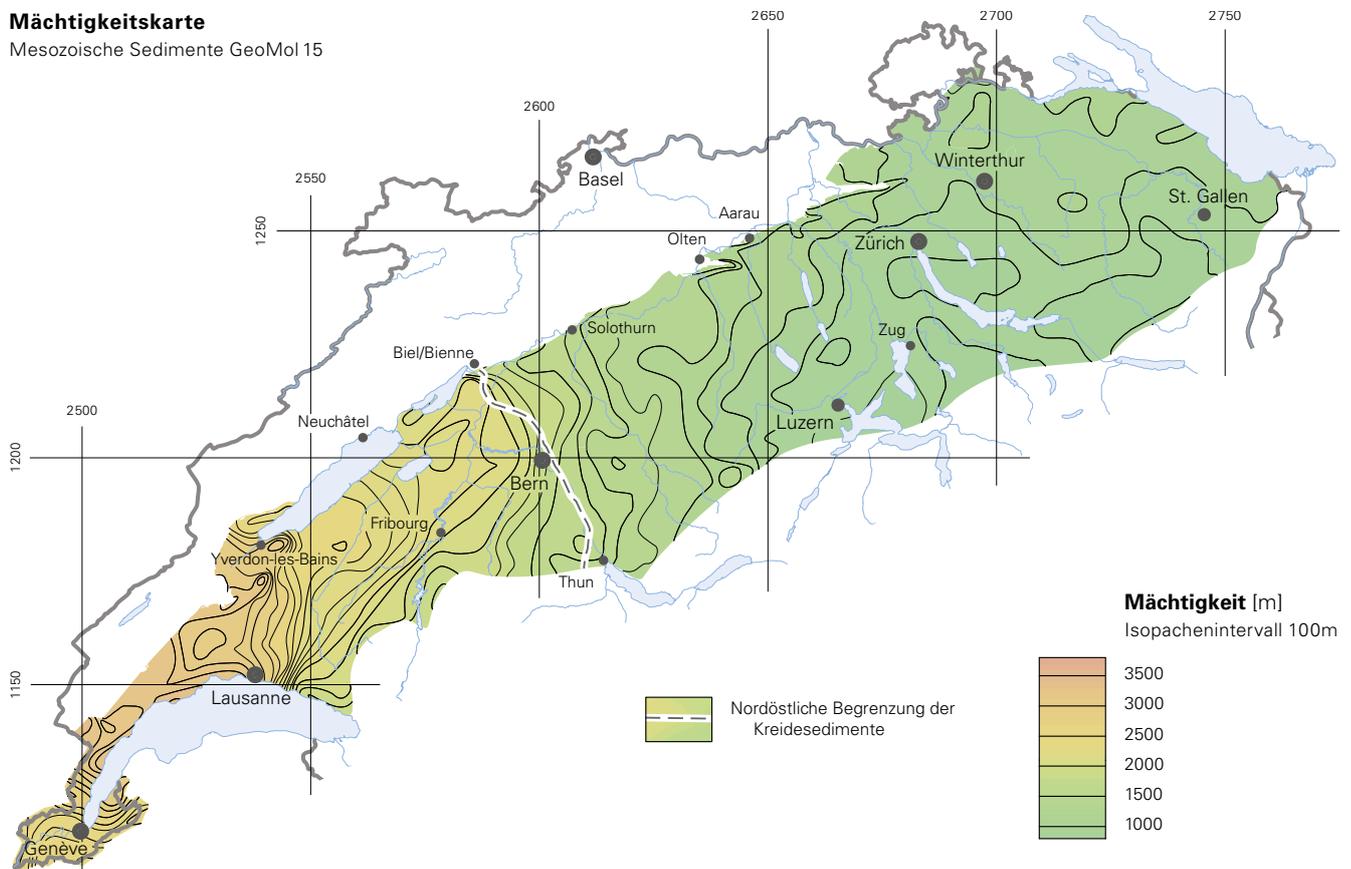


Fig. 6-5: Mächtigkeitkarte der mesozoischen Sedimente von GeoMol15.

wird hier nicht weiter eingegangen, sondern vielmehr auf die Beschreibung im SASMB verwiesen. In der Figur 6-5 wird eine deutliche Mächtigkeitsabnahme der mesozoischen Einheiten (von den Sedimenten der Kreide bis zu den triassischen Sedimenten) von Westen nach Osten ersichtlich. Die Mächtigkeit der mesozoischen Sedimente nimmt von Genf (über 3500 m) über Freiburg (ca. 2500 m) bis in die Ostschweiz (<1000 m) ab. Entsprechend diesen grossen Mächtigkeitsunterschieden von West nach Ost sind die Isolinien grösstenteils in Richtung Nord-Süd ausgerichtet (SOMMARUGA et al. 2012). Die Sedimente der Kreide dünnen von Genf (>300 m) nach Osten hin immer mehr aus, bis sie entlang des Aaretals zwischen dem Thunersee und der Bohrung Hermrigen-1 vollständig verschwinden (s. a. Fig. 2-3 u. Fig. 6-5).

## 6.2 GeoMol17

GeoMol17 ist ein umfassendes, detailliertes geologisches 3D-Modell, das sich aus verschiedenen Teilmodellen zusammensetzt. Diese wurden an den jeweiligen Grenzen aufeinander abgestimmt und zu einem einheitlichen 3D-Modell des Schweizer Molassebeckens zusammengefügt. Die auffälligsten Unterschiede zu GeoMol15 liegen bei der umfangreichen Modellierung von Störungszonen (Fig. 6-6) und bei der Anbindung der modellierten Horizonte an die Oberfläche. Es wurden bei GeoMol17 die gleichen geologischen Horizonte wie bei GeoMol15 modelliert. In den Teilmodellen Waadt und Freiburg wurde zudem der Top-UMM-Horizont erstellt. In den anderen Teilgebieten hingegen konnte dieser Horizont in den seismischen Daten nicht eindeutig erkannt werden; wurde daher nicht modelliert. Im Nordosten von GeoMol17 wurde zur Darstellung des Nordschweizer Permokarbondrogs der Basis-«Permokarbondrog»-Horizont erstellt.

Die Datengrundlage, vor allem die seismische Interpretation, wie auch die Wahl der Interpolationsmethode beeinflussen das resultierende Modell sehr stark. Gerade bei semiautomatischen Berechnungsvorgängen können je nach Eingangsdaten und Einstellungen stark unterschiedliche Resultate entstehen. Im Überlagerungsbereich zwischen den verschiedenen Teilmodellen konnten vor allem in der Nähe von Störungen Unterschiede von mehreren hundert Metern gemessen werden (Kap. 6.2.3). Diese Abweichungen sind aufgrund der abgeglichenen Grenzen (s. a. Kap. 5.3.7) nicht mehr sichtbar. Es ist aber dennoch von grösster Bedeutung, sich dieser Unterschiede beim Betrachten der Resultate bewusst zu sein.

Figur 6-6 gibt anhand von Modellprofilen und den modellierten Störungen einen Einblick in den inneren Aufbau von GeoMol17. Damit die grosse Zahl an modellierten Störungsflächen besser erkennbar ist, wurde die Darstellung von Blockmodellen wie in Figur 6-1 weggelassen. Zudem wurde die Modellansicht so ausgerichtet, dass der Fokus auf der Darstellung der Störungen liegt. Die detailgetreuere Horizontmodellierung lässt sich bei diesem Massstab kaum von GeoMol15 unterscheiden. Unregelmässige Mächtigkeitsschwankungen einer einzelnen modellierten Einheit hängen oft mit der datentreuen, unabhängigen Horizontmodellierung von GeoMol17 zusammen.

Die Profilsuren A und B in Figur 6-6 entsprechen denjenigen von Figur 6-1 und ermöglichen auf diese Weise den Vergleich zwischen den beiden Modellen. Aus diesem Grund wird eine allgemeine Profilbeschreibung weggelassen und vielmehr auf die Unterschiede zwischen den beiden Modellen hingewiesen.

### *Profil A*

Der strukturelle Stil im Nordwesten des Modells wird geprägt von der Hermrigen-Struktur, einer Überschiebungsstruktur, die weiter westlich in eine N-S verlaufende sinistrale Blattverschiebung dreht (s. a. Fig. 6-8). Diese Struktur setzt sich in GeoMol17 aus mehreren nordwestvergenten Überschiebungen sowie einer konjugierten südostvergenten Überschiebung zusammen. Die Hauptüberschiebung der Hermrigen-Struktur bildet zusammen mit der Rücküberschiebung eine emporgehobene Struktur («Pop-up»-Struktur). Die Versatzmodellierung dieser komplexen Struktur in GeoMol17 führt dazu, dass trotz der Eichung der Horizonte an der Tiefbohrung Hermrigen-1 die Schichtmächtigkeit von GeoMol17 und GeoMol15 (keine Versatzmodellierung, Kap. 6.1.1) variieren.

Die mesozoischen Einheiten zeigen südöstlich von Bern schwache Faltenstrukturen auf, welche durch weiter westlich gelegene Überschiebungen (Fig. 6-8) hervorgerufen wurden. Diese Strukturen sind sehr lokal und verschwinden wenig östlich der Profilspur vollständig. Grossräumige Faltenstrukturen wurden hauptsächlich in den känozoischen Sedimenten modelliert. Im Profil A ist mit dem modellierten USM/OMM-Kontakt die Belpberg-Synklinale ersichtlich (Fig. 2-4).

In der seismischen Interpretation konnte die Triangelzone im Süden des Molassebeckens wenige Kilometer weiter westlich der Aaretal-Querstörung beobachtet werden. Das Profil A (Fig. 6-6) zeigt einen Schnitt durch die modellierte Triangelzone, die von der Gürbetal-Querstörung dextral versetzt wurde.

### *Profil B*

Die markantesten Unterschiede zwischen dem Profil B von GeoMol17 (Fig. 6-6) und demjenigen von GeoMol15 (Fig. 6-1) können im Nordwesten des Profils festgestellt werden. Die detailliertere, aber vermutlich immer noch stark vereinfachte Modellierung des Nordschweizer Permokarbondrogs in GeoMol17 stützt sich auf die seismische Interpretation der Daten aus der Etappe 2 des Sachplans Geologische Tiefenlager (MADRITSCH et al. 2013, NAEF & MADRITSCH 2014, NAGRA 2014).

Das Baden-Irchel-Herdern-Lineament am Trogrand und die komplexe «Fischschwanz»-Struktur der Stadel-Irchel-Störungszone (MALZ et al. 2016) werden im Profil B angeschnitten. In GeoMol17 wurde dieses Zusammenspiel von nordvergenten Überschiebungen und südvergenten Rücküberschiebungen und die damit zusammenhängenden Versätzen detailliert modelliert (s. a. Kap. 6.2.1.5). Anders als bei GeoMol15 wurde die nordvergenten Überschiebungen der Jurahauptüberschiebung und der Lägern-Antiklinale vollständig modelliert und nicht aus dem Modell ausgeschnitten.

**GeoMol17**  
Modelleinblick

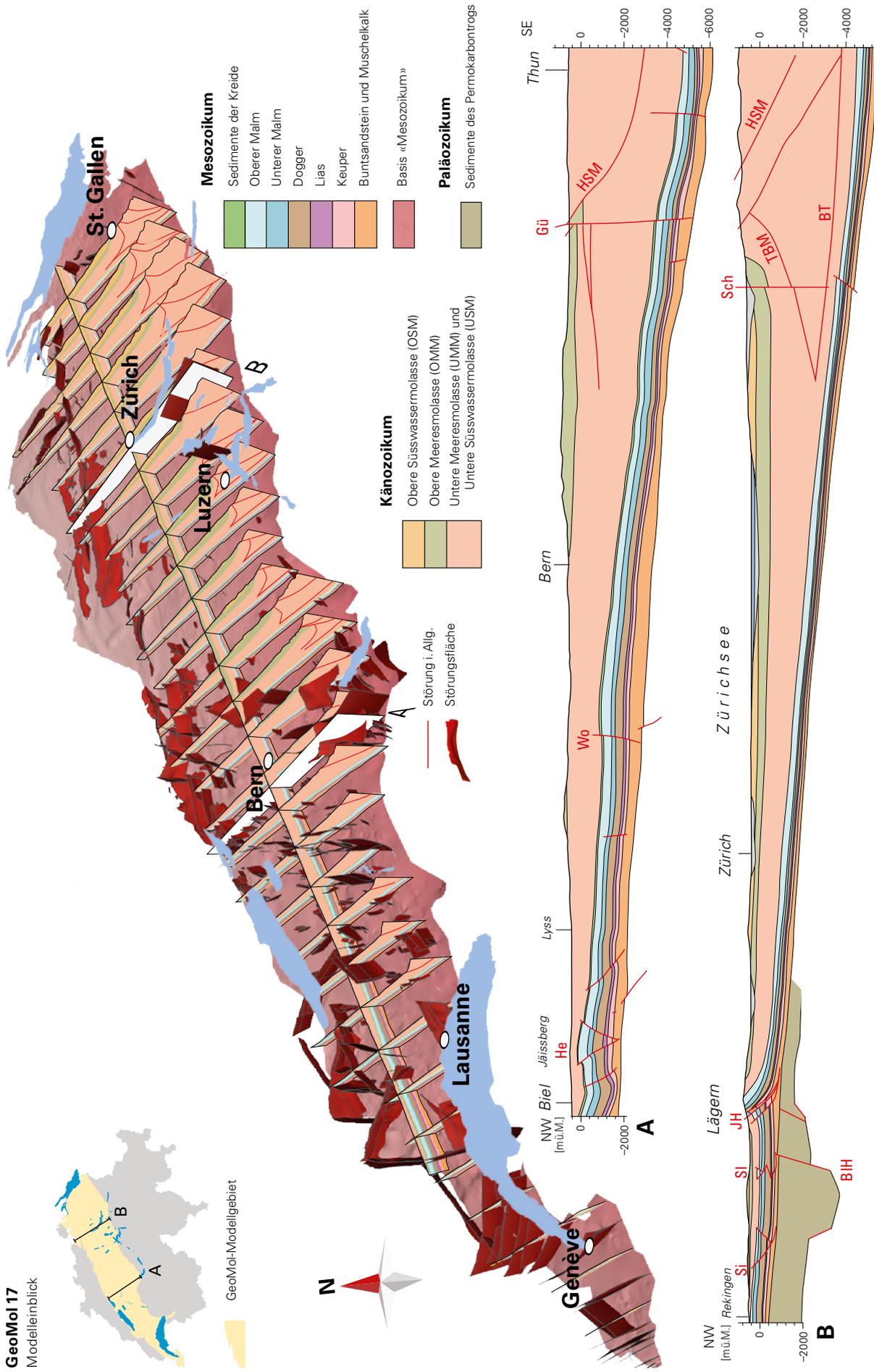


Fig. 6-6: Einblick in GeoMol17. Profilschnitte durch GeoMol17 und die 3D-Darstellung der Störungsfächen zeigen den inneren Aufbau des Modells bei zweifacher Überhöhung. Profil A und Profil B zeigen deutlich die detaillierte Störungsmodellierung von GeoMol17. Die Profile A und B lassen sich mit denjenigen von GeoMol15 (Fig. 6-1) vergleichen. Modellierte Störungszone: BIH = Baden-Irchel-Herdern, BT = Basale Überschiebung der Triangelzone, Gü = Gürbetal, He = Hermrigen, HSM = Hauptüberschiebung der subalpinen Molasse, JH = Jurahauptüberschiebung, SI = Siglistorf, Sch = Schindellegi, SI = Stadel-Irchel, TBM = Südliche tektonische Begrenzung der mittelländischen Molasse, Wo = Wohlen.

Im Südwesten des Profils kann die aus geologischen Aufschlüssen bekannte Aufrichtung der mittelländischen Molasse am Südrand des Molassebeckens beobachtet werden. Die steil nach Norden einfallenden Molasse-Einheiten sowie die Störungen der Triangelzone werden von der NW-SE verlaufenden Schindellegi-Querstörung dextral verstellt (HANTKE et al. 2009).

### 6.2.1 Störungen

Im Gegensatz zu GeoMol15 wurden in GeoMol17 die Störungszonen des Molassebeckens mit ungefähr 500 Störungen ausführlich und mit einem hohen Detaillierungsgrad modelliert. Aufgrund der unterschiedlichen Vorgehensweise bei der Störungsmodellierung variiert das allgemeine Erscheinungsbild der modellierten Störungsflächen in den verschiedenen Modellgebieten. Die Unterschiede lassen sich vor allem in der Störungsform erkennen, die stark davon abhängt, wie die Störungen lateral verlängert und abgegrenzt wurden (s.a. Tab. 5-3). In den Teilmodellen Genf, Waadt, Freiburg und Bodensee wurden die modellierten Störungen senkrecht abgeschnitten und bilden daher eckige Störungsflächen. In den Teilmodellen Bern und Landesgeologie wurden die Störungsflächen unter Berücksichtigung des Versatz-Länge-Verhältnisses verlängert (s.a. Kap. 5.3.6.2). Dies bewirkt, dass die modellierten Störungen eine unregelmäßig abgerundete bis elliptische Begrenzung aufzeigen. Die vertikale Begrenzung der Störungsflächen wurde, falls eine Störung bis an die Oberfläche reicht, mit dem Höhenmodell der Felsoberfläche verschnitten. Störungen, welche die Molassesedimente nicht vollständig durchtrennen, wurden meist um einen bestimmten Betrag über Basis «Känozoikum» verlängert. Die vertikale Verlängerung der Störungsflächen nach unten erfolgte ähnlich, ausser wenn die Störungen mit einem basalen Abscherhorizont in den Triassedimenten zusammenhängen. Dann wurden die Störungsflächen so modelliert, dass sie in der Muschelkalk- oder Keuper-Einheit auslaufen.

Viele der modellierten kleineren Störungsflächen sind nur wenige Kilometer lang und wurden als einzelne Störungsflächen erstellt. Andere Störungen, vor allem die grösseren Störungszonen, die sich über 20 km bis 30 km erstrecken, stellen zusammenhängende Störungssysteme dar. Diese, beispielsweise Blumenstrukturen bei Blattverschiebungen, wurden meist vereinfacht modelliert.

Die folgenden Kapitel geben einen generellen Überblick über das Störungsmodell von GeoMol17, welches anhand ausgewählter Störungszonen näher beschrieben und diskutiert wird.

#### 6.2.1.1 Genereller Überblick

Im Schweizer Molassebecken wurden verschiedene Störungstypen modelliert: Abschiebungen, Auf- und Überschiebungen und Blattverschiebungen. Das Vorkommen der verschiedenen Störungstypen ist auf Höhe Basis «Känozoikum» sehr ausgeglichen: je etwa ein Drittel aller modellierten Störungen sind Abschiebungen, Aufschiebungen oder Blattverschiebungen (Fig. 6-7). Die Verteilung der Störungen auf Niveau Basis «Mesozoikum» verändert sich stark. Die

Abnahme der Datenqualität unterhalb der mesozoischen Einheiten sowie die Schwerpunktsetzung beim Aufbau des Modells haben dazu geführt, dass die Störungen des Grundgebirges in den verschiedenen Teilmodellen sehr unterschiedlich modelliert wurden.

Die anschliessende Beschreibung der Störungszonen bezieht sich auf die Resultate im Modell GeoMol17.

#### *Abschiebungen*

Die meisten modellierten Abschiebungen streichen in NE-SW-Richtung, parallel zur Hauptorientierung des nord-alpinen Vorlandbeckens. Diese Störungen versetzen die mesozoischen Schichten und schieben diese grösstenteils Richtung Südosten ab. Ein paar wenige antithetische Störungen wurden vor allem im Süden modelliert. Teilweise versetzen hier die grösseren Störungen die mesozoischen Sedimente beträchtlich (bis zu 400 m).

Eine weitere häufige Orientierung der Abschiebungen liegt in Richtung ENE-WSW. Diese Ausrichtung kommt hauptsächlich im Nordosten des Modellgebiets vor und hängt mit dem Nordschweizer Permokarbondrog zusammen.

Vor allem im östlichen Bereich des Schweizer Molassebeckens wurden auch N-S streichende Abschiebungen modelliert, welche die mesozoischen Einheiten nach Osten hin abschieben (z.B. St.-Gallen-Störungszone). Der modellierte vertikale Versatz an diesen Störungen erreicht an einzelnen Stellen bis zu 230 m.

Im Teilgebiet Bern wurde grosses Gewicht auf die Störungen des Grundgebirges gelegt, daher unterscheidet sich dort die Orientierung der Abschiebungen auf Basis «Mesozoikum» (Fig. 6-9) teilweise markant von derjenigen von Basis «Känozoikum» (Fig. 6-8).

#### *Auf- und Überschiebungen*

Die räumliche Orientierung der Auf- und Überschiebungen im Schweizer Molassebecken zeigt einen deutlichen Trend, der von NE-SW bis ENE-WSW reicht (Fig. 6-7). Die meisten Überschiebungen treten im distalen Bereich des Schweizer Molassebeckens in der Subjurassischen Zone auf. Diese nordwest- und südostvergente Störungen streichen parallel zu den Antiklinalen des Faltenjuras und rotieren im Schweizer Molassebecken von Westen nach Osten um etwa 30°.

Oft treten Überschiebungen auch im Zusammenhang mit anderen Störungen auf. So gehen im Gebiet von Biel-Solothurn NE-SW-orientierte, nordwestvergente Überschiebungen in N-S-gerichtete laterale Rampen über, so wie es beispielsweise bei der Hermrigen-Störungszone der Fall ist. Bei der Stadel-Irchel-Störungszone verzweigen Überschiebungen in eine komplexe «Fischschwanz»-Struktur (s.a. Kap. 6.2.1.5).

Die meisten Über- und Aufschiebungen scheren in den triassischen Evaporiten ab. Aus diesem Grund ist der Versatz in den verstellten mesozoischen Einheiten oft unterschiedlich gross und nimmt in der Regel von den triassischen Einheiten nach oben hin ab.

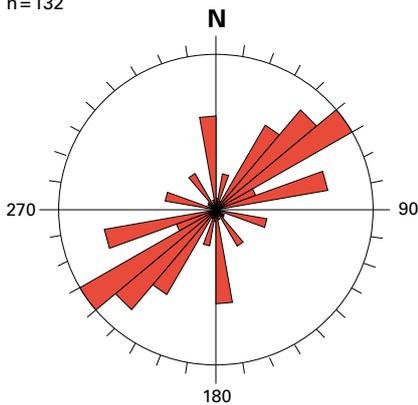
Am Südrand des Molassebeckens streichen die Hauptüberschiebung der subalpinen Molasse und östlich des Aare-

## Störungstypen

Basis «Känozoikum»

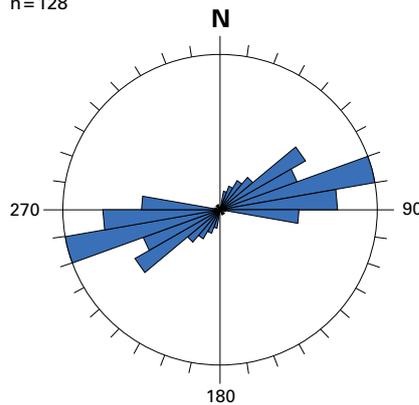
Abschiebungen

n=132



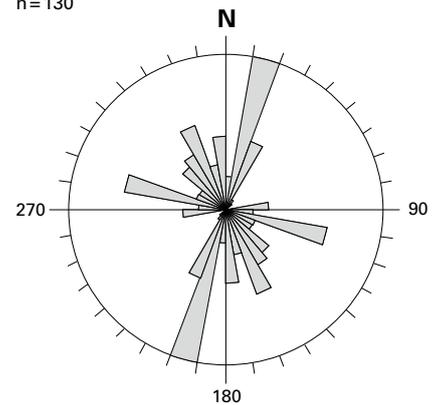
Auf- und Überschiebungen

n=128



Blattverschiebungen

n=130

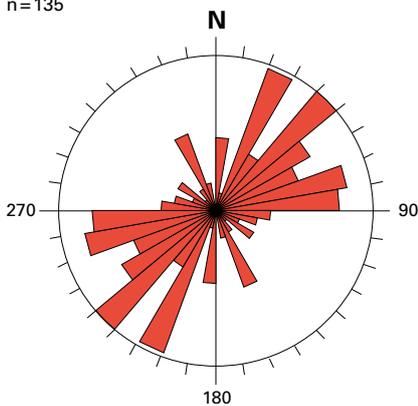


## Störungstypen

Basis «Mesozoikum»

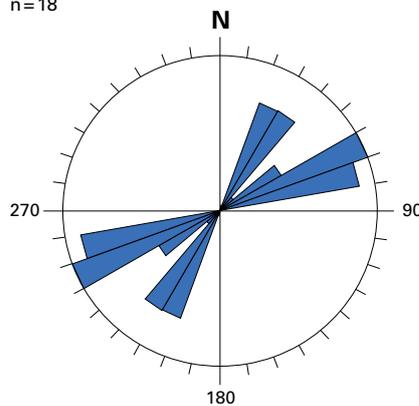
Abschiebungen

n=135



Auf- und Überschiebungen

n=18



Blattverschiebungen

n=36

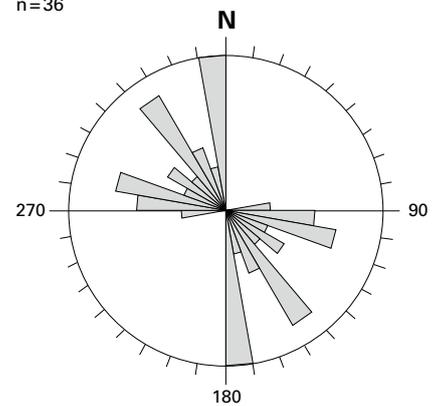


Fig. 6-7: Rosendiagramme der modellierten Abschiebungen, Aufschiebungen und Blattverschiebungen auf Höhe Basis «Känozoikum» und Basis «Mesozoikum» (GeoMol17). Die Orientierung der Störung wurde nach Länge gewichtet.

tals die südliche tektonische Begrenzung der mittelländischen Molasse in NW-SE-Richtung und bilden so zusammen eine Triangelzone (s. a. Kap 6.1.1). Diese Überschiebungen versetzen nur die känozoischen Sedimente und sind daher nicht auf der Karte in Figur 6-8 eingezeichnet.

### Blattverschiebungen

Auf Höhe Basis «Känozoikum» können deutlich drei Hauptorientierungen von Blattverschiebungen erkannt werden. Die meisten Störungen streichen NNW-SSE, die zweithäufigste Ausrichtung ist in Richtung WNW-ESE und als dritte Trendrichtung kann eine NNE-SSW-Orientierung erkannt werden (Fig. 6-7). Blattverschiebungen fallen in der Regel sehr steil ein und durchtrennen meist das gesamte Deckgebirge. Ob die Blattverschiebungen bis in das Grundgebirge reichen, ist noch nicht vollständig geklärt, aus diesem Grund enden in den meisten Teilmodellen diese Störungszonen in den triassischen Evaporiten. In den Modelliergebieten von Genf und Waadt konnte in den seismischen

Daten beobachtet werden, dass diese Blattverschiebungen bis in das Grundgebirge reichen.

Die meisten NNE-SSW streichenden Blattverschiebungen zeigen einen sinistralen Bewegungssinn auf. Die beiden anderen Hauptrichtungen entsprechen dem grossräumigen, konjugierten Störungssystem bestehend aus WNW-ESE streichenden dextralen und NNW-SSE-orientierten sinistralen Blattverschiebungen.

In seismischen Daten können Blattverschiebungen als bis zu mehrere Kilometer breite diffuse Zonen erkannt werden. Diese bestehen oft in der Tiefe aus einer einzelnen tiefen Hauptstörung, die sich nach oben hin immer mehr verzweigt und auf diese Weise eine komplexe Blumenstruktur bilden.

### Basaler Abscherhorizont (Décollement)

Das Vorhandensein eines basalen Abscherhorizonts in den Evaporiten des Keupers und des Muschelkalks ist allgemein anerkannt (s. a. Kap. 2.4.4). Dennoch wurde auf eine

durchgehende Modellierung einer mit dem Abscherhorizont assoziierten Störung bei GeoMol17 verzichtet. Zum einen ist eine horizontale Störung parallel zur Schichtung in den seismischen Daten nur schwer erkennbar, zum anderen ist die östliche Begrenzung dieses Abscherhorizonts nicht endgültig geklärt. Es muss auch davon ausgegangen werden, dass es sich bei diesem Décollement eher um eine Deformationszone und nicht um eine einzelne, diskrete Störungsfläche handelt.

Bei GeoMol17 wurde zwar ein basaler Abscherhorizont modelliert, der jedoch mehr die Funktion eines Konstruktionshorizonts hat. Auf diese Weise konnten jene modellierten Störungsflächen, die Basis «Mesozoikum» nicht durchtrennen mit diesem Horizont verschnitten werden.

### 6.2.1.2 Störungszonen im Schweizer Molassebecken

Die räumliche Anordnung der modellierten Störungszonen in GeoMol17 wird in den folgenden Unterkapiteln von West nach Ost für das Grundgebirge, die mesozoischen und die känozoischen Sedimente beschrieben.

#### *Modellierte Störungszonen in känozoischen Einheiten*

Störungszonen, die ausschliesslich in den Molasse-sedimenten vorkommen, wurden nur im Bereich der subalpinen Triangelzone modelliert (s. a. Kap. 6.1.1). Bei allen anderen Störungen in den känozoischen Einheiten handelt es sich um Strukturen, die in den mesozoischen Einheiten oder im Grundgebirge wurzeln. Einige dieser Störungen reichen bis zur Oberfläche, andere enden innerhalb der Molasse-Einheiten.

#### *Modellierte Störungszonen in mesozoischen Einheiten*

Innerhalb der mesozoischen Einheiten kann nicht nur eine allgemeine Abnahme des Deformationsgrads von Westen nach Osten beobachtet werden, sondern auch eine deutliche Änderung der strukturellen Gegebenheiten. Dies ist deutlich auf der Übersichtskarte aller modellierten Störungszonen auf Höhe Basis «Känozoikum» erkennbar (Fig. 6-8). Im Kapitel 6.1.1 werden die wichtigsten Störungszonen beschrieben, die im Rahmen von GeoMol15 modelliert wurden. Trotz des höheren Detaillierungsgrads der modellierten Störungen von GeoMol17 trifft diese Beschreibung auch für die meisten Störungszonen von GeoMol17 zu.

Im Westen dominieren grossräumige, zum Teil konjugiert angeordnete Transformstörungen (z.B. Pontarlier-Vallorbe- Aubonne, La-Sarraz). Die Fribourg-Zone ist geprägt von einer Ansammlung N-S-orientierter kleinräumiger Störungen, die sich «en-échelon» anordnen.

Im südlichen Randgebiet des Molassebeckens herrschen WSW-ENE streichende Abschiebungen vor, wobei Auf- und Überschiebungen vor allem im Norden, südlich des Juragebirges anzutreffen sind. In der Region Biel-Solothurn werden diese Überschiebungen teilweise von grossräumigen NNE-SSW streichenden Transformstörungen versetzt. Im zentralen und östlichen Bereich des Schweizer Molassebeckens wurden wenige Störungen modelliert, meist kleinräumige, en-echelon angeordnete Abschiebungen.

Erwähnenswert sind auch die NNW-SSE streichenden, dextralen Aaretal- und Gürbetal-Transformstörungen. Zusammen definieren sie eine mehr als 5 km breite Störungszone, welche die meso- und die känozoischen Einheiten versetzen. Die kompressiven Strukturen der Stadel-Irchel-Antiklinale mit der Ausbildung einer komplexen «Fischschwanz»-Struktur werden im Kapitel 6.2.1.5 ausführlich behandelt. Nordöstlich dieser Strukturen liegen die NW-SE streichende Neuhausen-Störung und die etwa 10 km weiter westlich gelegene Randen-Störung. Im Bereich dieser beiden Abschiebungen zeigt die Interpretation seismischer Daten einen deutlichen Versatz der Basis der mesozoischen Einheiten Richtung Nordosten (NAGRA 2008, EGLI et al. 2016).

#### *Modellierte Störungszonen im Grundgebirge*

Die Modellierung der Störungen unterhalb von Basis «Mesozoikum» lag nicht im Fokus von GeoMol17. Aus diesem Grund wurden diese Störungszonen je nach Modellgebiet mit unterschiedlicher Genauigkeit erstellt.

Der strukturelle Stil westlich des Genfersees ist geprägt von grossräumigen Blattverschiebungen, die hauptsächlich einen sinistralen Versatz aufweisen. Diese Störungen konnten eindeutig in den mesozoischen Einheiten beobachtet werden und in GeoMol17 mit Störungen des Grundgebirges verbunden werden. Der Zusammenhang zwischen den Störungen des Deckgebirges mit denjenigen des Grundgebirges war jedoch in den seismischen Daten nicht deutlich erkennbar. Daher wurde die Störungsfläche zwar modelliert, der Basis-«Mesozoikum»-Horizont hingegen nicht versetzt.

Weiter östlich zwischen Aubonne und Yverdon, kann ein Zusammenspiel von konjugierten sinistralen, NNW-SSE und dextralen, NE-SW streichenden Blattverschiebungen erkannt werden. Zu den sinistralen Störungen zählen die Pontarlier-Vallorbe-Aubonne-, die Le-Suchet-, die Rances-Baulmes- und die Essertines-Störungszone. Zu den dextralen Querstörungen gehören die La-Sarraz-, die Baulmes-Chamblon- und die La-Lance-Störungszone. Dazwischen können neben den Querstörungen auch nordwest- oder südostvergente Aufschiebungen beobachtet werden. Die Störungen wurden bis in das Grundgebirge verlängert, unter der Annahme, dass lokale Störungen des Grundgebirges nach der Fernschub-Phase aktiv waren (MARCHANT & BAUER 2016, s. a. Tafel I, Profil 4, 5 und 6).

Die Blattverschiebungen der Fribourg-Zone (s. a. Kap. 6.1.1) mit den sinistralen Störungszonen Rossens, St. Silvester und Fendingen (Fig. 6-9) setzen sich nach aktuellen Studien (SOMMARUGA et al. 2016, VOUILLOMOZ et al. 2017, GRUBER 2017) nicht bis in das Grundgebirge fort. GRUBER et al. (2016) haben bei GeoMol17 den Schwerpunkt auf die Störungen in den meso- und känozoischen Sedimenten gelegt. Sie schliessen jedoch das Vorhandensein von Strukturen im Grundgebirge nicht aus. Wie diese jedoch mit den Strukturen des Deckgebirges zusammenhängen, kann nur auf seismische Daten gestützt, nicht eindeutig geklärt werden.

Im Gebiet zwischen Biel und Solothurn wurden mehrere NNE-SSW streichende Abschiebungen modelliert, die nur das Grundgebirge versetzen.

**Modellierte Störungszonen**  
Höhe Basis «Känozoikum»  
GeoMol 17

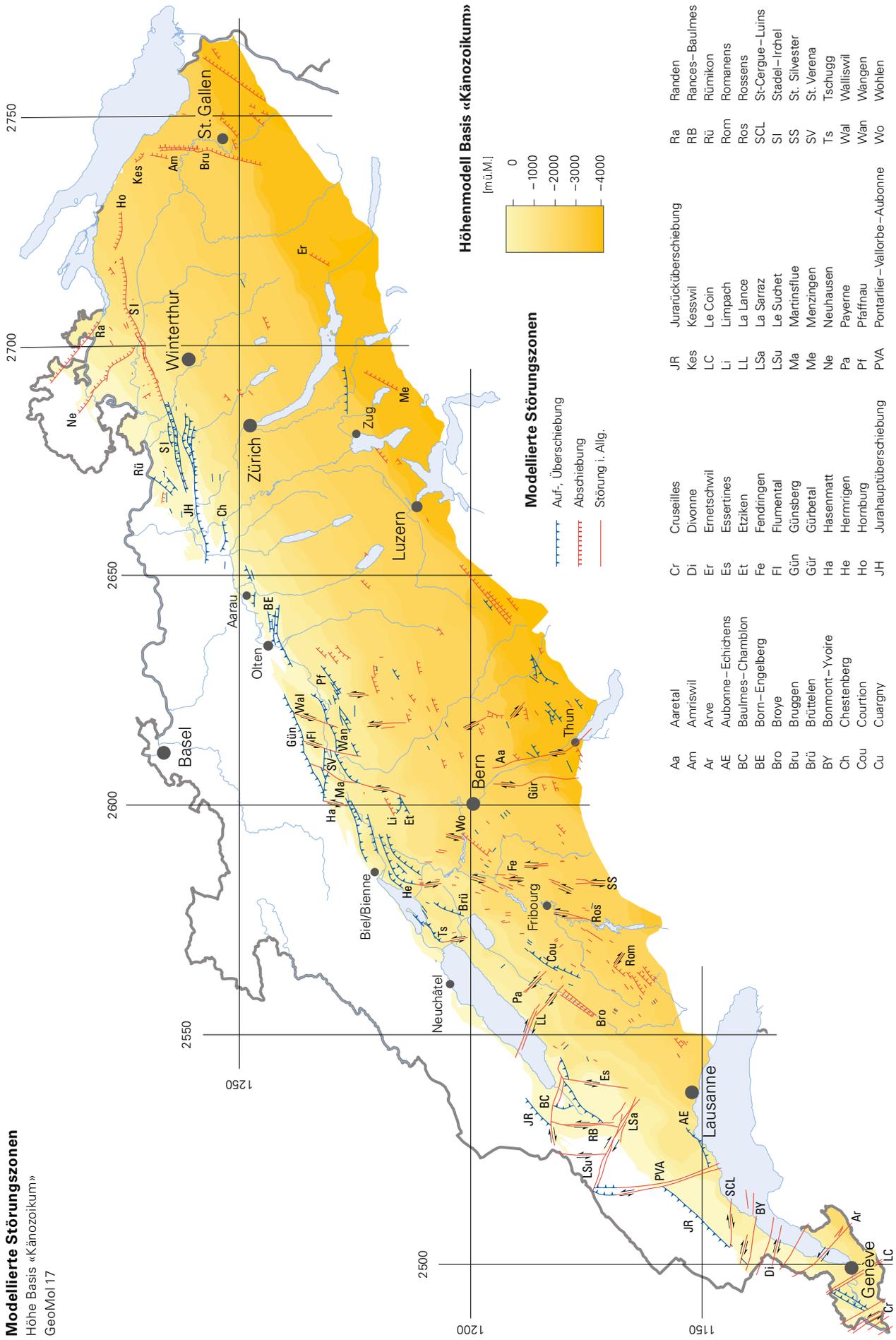


Fig. 6-8: Übersichtskarte der in GeoMol17 modellierten Störungen auf Höhe Basis «Känozoikum». Die als Linien dargestellten Störungslinien entsprechen den Schnittlinien zwischen den Störungsflächen und dem modellierten Horizont Basis «Känozoikum».

**Modellierte Störungszonen**  
Höhe Basis «Mesozoikum»  
GeoMol 17

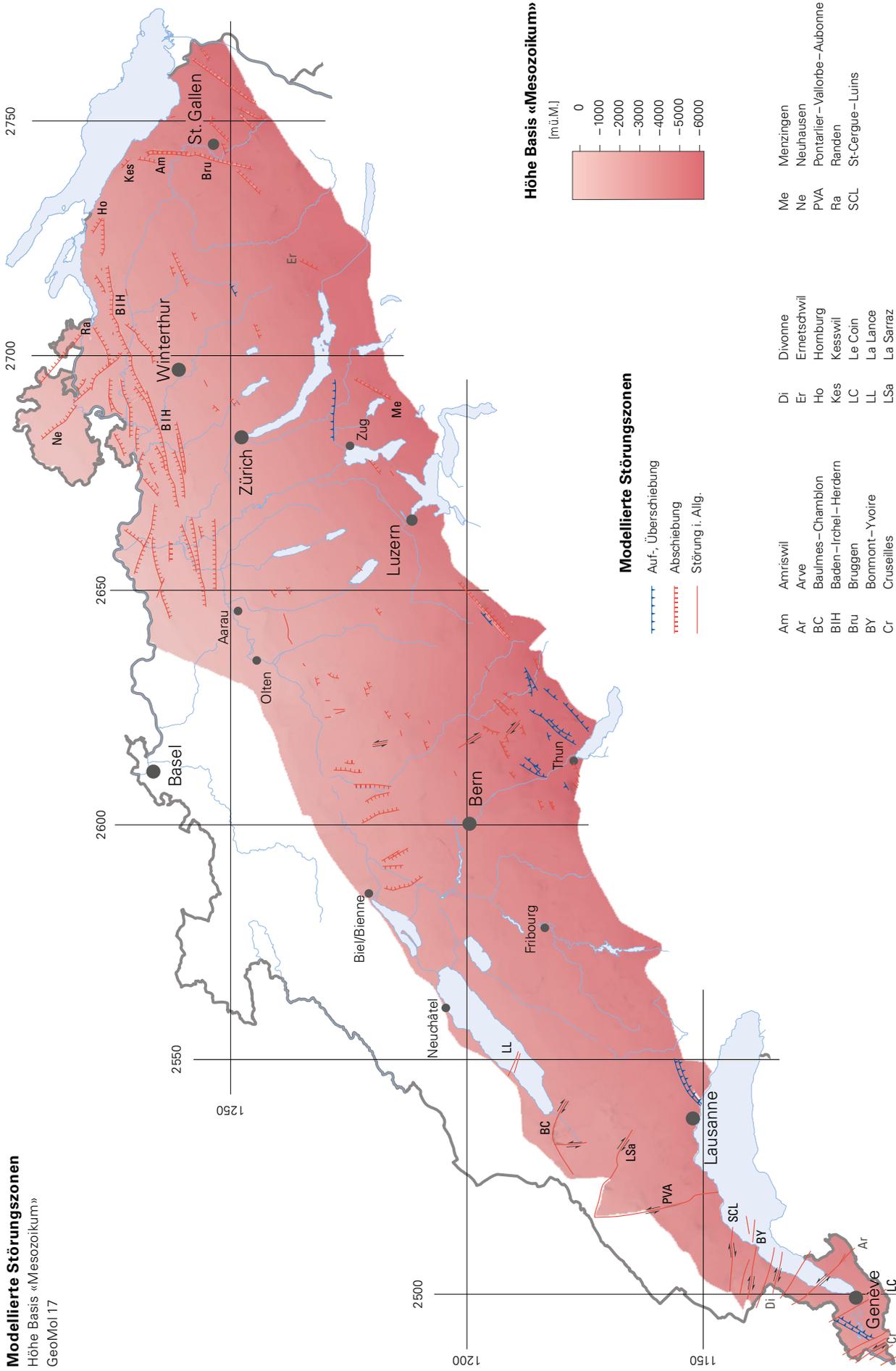
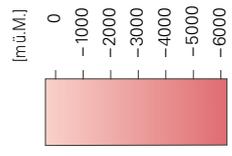


Fig. 6-9: Übersichtskarte der in GeoMol17 modellierten Störungen auf Höhe Basis «Mesozoikum». Die als Linien dargestellten Störungsflächen entsprechen den Schnittlinien zwischen den Störungsflächen und dem modellierten Horizont Basis «Mesozoikum». Da die Störungszonen nicht konsequent seismisch kartiert werden konnten, wurden die Störungszonen des Grundgebirges nicht in allen Gebieten des Schweizer Molassebeckens modelliert.

**Modellierte Störungszonen**

- Auf-, Überschiebung
- Abschiebung
- Störung i. Allg.

**Höhe Basis «Mesozoikum»**  
(mü.M.)



- |     |                      |     |             |     |                             |
|-----|----------------------|-----|-------------|-----|-----------------------------|
| Am  | Amriswil             | Di  | Divonne     | Me  | Menzingen                   |
| Ar  | Arve                 | Er  | Ernetschwil | Ne  | Neuhäusen                   |
| BC  | Baulmes-Chamblon     | Ho  | Hornburg    | PVA | Pontarlier-Valloire-Aubonne |
| BIH | Baden-Irchel-Herdern | Kes | Kesswil     | Ra  | Randen                      |
| Bru | Bruggen              | LC  | Le Coin     | SCL | St-Cergue-Luins             |
| BY  | Bonmont-Yvoire       | LL  | La Lance    |     |                             |
| Cr  | Crusilles            | LSa | La Sarraz   |     |                             |

## Born-Engelberg-Störungszone

GeoMol 17

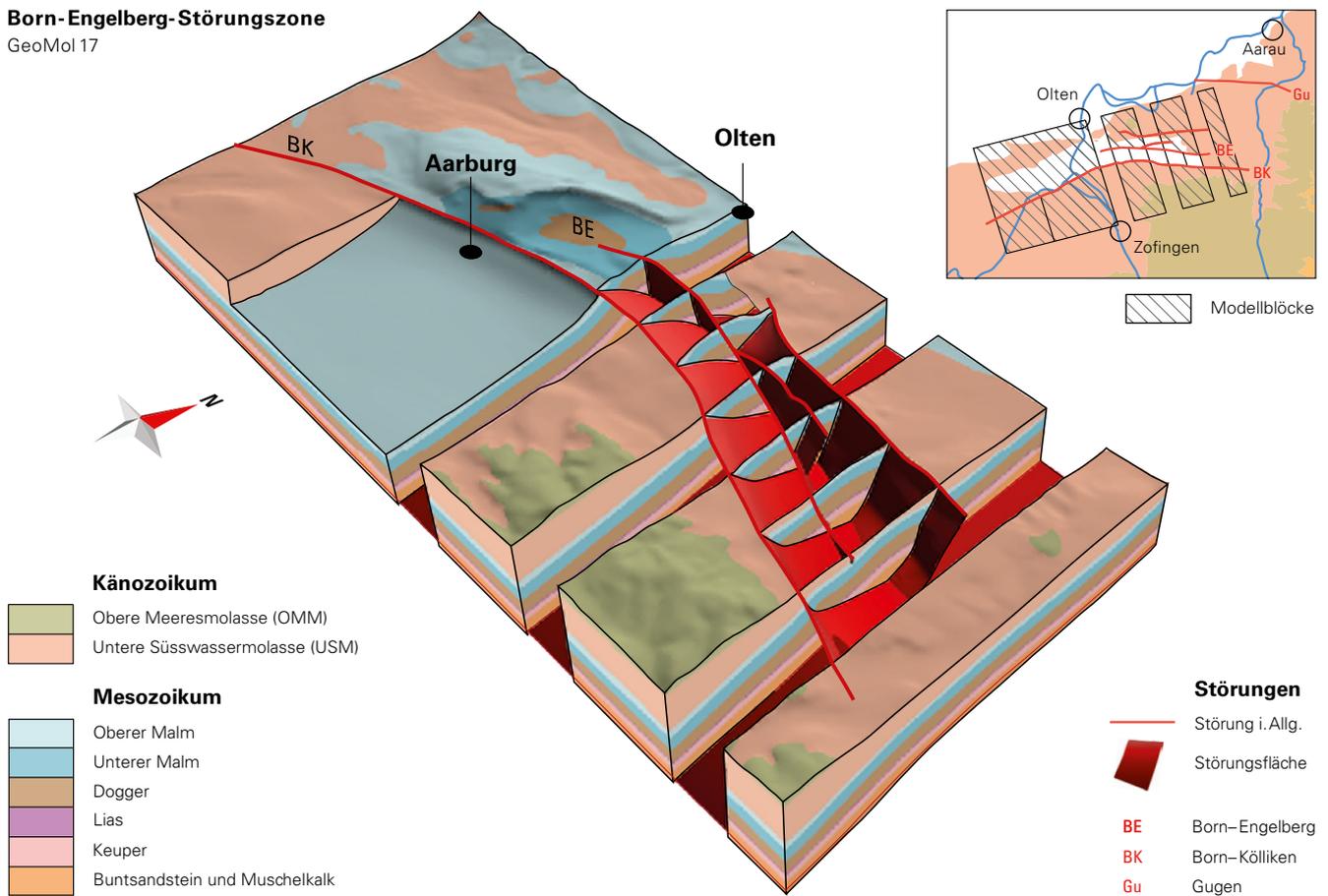


Fig. 6-10: Modelleinblick im Gebiet der Born-Engelberg-Störungszone anhand von Modellblöcken und Profilspreuen.

Östlich des Aaretals dominieren Überschiebungen aus dem Grundgebirge, die den gesamten mesozoischen Sedimentstapel versetzen. In den Sedimenten der Unteren Süsswassermolasse können diese Überschiebungen nicht mehr weiterverfolgt werden (s. a. Tafel I & II, Profil 12 und 13).

Südlich des Juras, zwischen Solothurn und Aarau, weisen geologische Profile (NAGRA 2008, JORDAN et al. 2011) auf Abschiebungen im Grundgebirge hin. Für die räumliche Modellierung gaben diese Interpretationen zu wenig Anhaltspunkte. Aus diesem Grund wurden die Strukturen des Grundgebirges in diesem Gebiet nicht modelliert.

Die meisten modellierten Strukturen im Grundgebirge befinden sich im Nordosten des Modellgebiets und hängen hauptsächlich mit den Strukturen des Nordschweizer Permokarbons zusammen (s. a. Kap 6.2.1.5). Trotz der guten Datenabdeckung des Gebiets durch die seismische Interpretation der Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (MADRITSCH et al. 2013, NAGRA 2014) bleibt ein grosser Interpretationsspielraum für die räumliche Modellierung. Aus diesem Grund entstand die Strukturmodellierung in starker Anlehnung an die Interpretationen auf der konzeptionellen tektonischen Karte des Nordschweizer Permokarbons (NAEF & MADRITSCH 2014). Die Strukturen um das Baden-Irchel-Herdern-Lineament werden ausführlich in Kapitel 6.2.1.5 behandelt.

Es wird davon ausgegangen, dass im Osten des molassebeckens der basale Abscherhorizont in den triassischen Ein-

heiten fehlt, wodurch die Strukturen des Grundgebirges nicht von denjenigen des Deckgebirges entkoppelt wurden. Die NNE-SSW streichenden Abschiebungen im Raum St. Gallen (s. a. Kap. 6.2.1.4) wurzeln in den Randverwerfungen von kleinen Permokarbons (HEUBERGER et al. 2016).

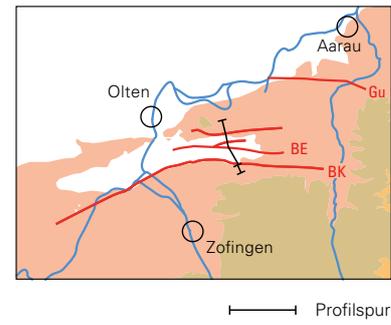
### 6.2.1.3 Born-Engelberg-Störungszone

Die etwa 12 km lange Born-Engelberg-Antiklinale streicht im Westen von WSW-ENE und dreht gegen Osten in eine W-E-orientierte Streichrichtung. Im Osten teilt sich diese Struktur in zwei Gewölbe auf: die nördliche Born-Engelberg- und die südliche Born-Kölliken-Antiklinale. Die Südflanke der Born-Engelberg-/Kölliken-Antiklinale schiebt sich asymmetrisch auf das südlich gelegene Vorland. Die nördliche Flanke versteilt sich von Westen nach Osten und bildet im Osten eine Überschiebung aus, die sich gegen Norden schiebt. Zudem wird die Born-Engelberg-Struktur von mehreren grösseren Querstörungen durchschnitten (JORDAN et al. 2011).

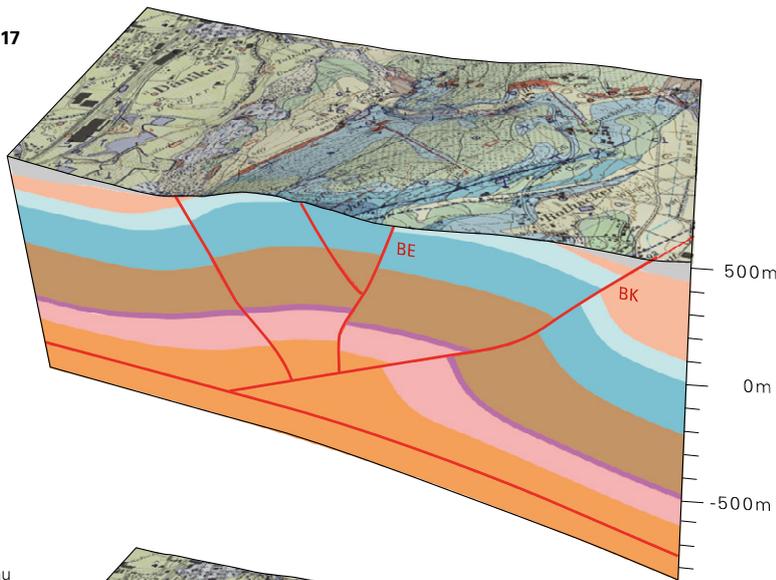
Die Aareklus zwischen Aarberg im Süden und Olten im Norden gibt einen Einblick in das Innere der Antiklinale und zeigt die stratigraphischen Einheiten bis zur Basis der Wildegg-Formation (modelliert als Top-Dogger-Horizont; Fig. 6-10).

Die Modellierung der Born-Engelberg-Struktur stützt sich auf den geologischen Karten und Profile des GA25

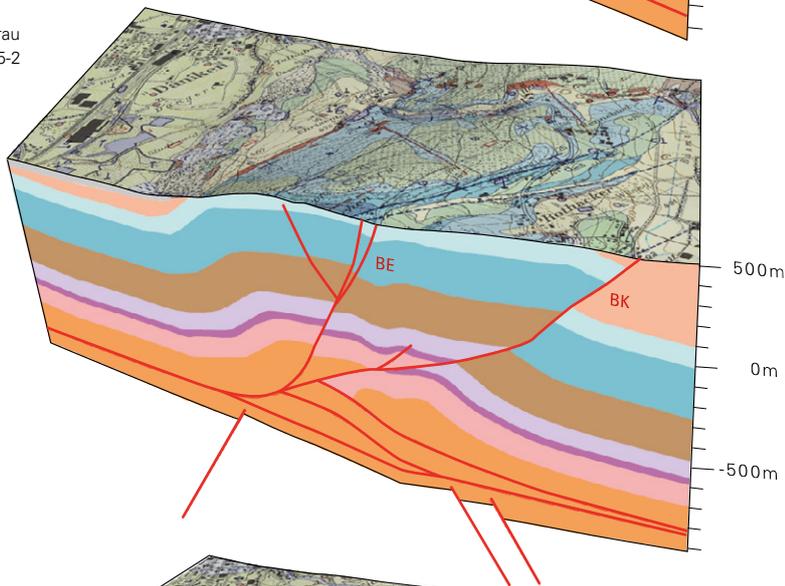
**Born-Engelberg-Störungszone**  
unterschiedliche Interpretationen



**A**  
GeoMol 17



**B**  
GA 25  
1089 Aarau  
Profil 135-2



**C**  
Nagra  
NAB 14-105  
Profil 6-12

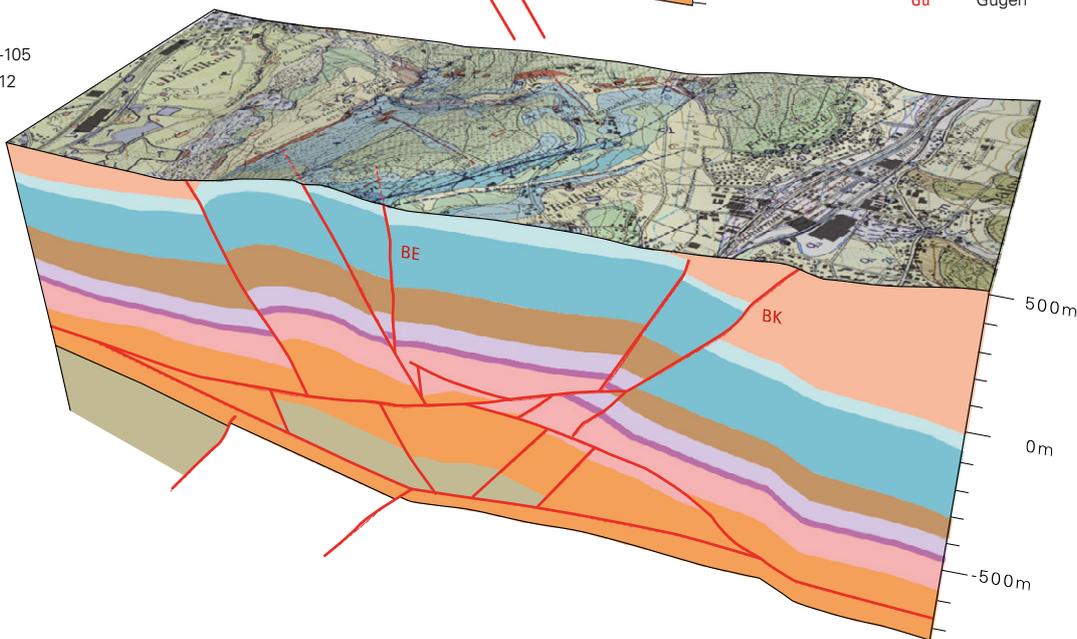


Fig. 6-11: 3D-Profilansicht mit unterschiedlichen Interpretationen. Profil A zeigt einen Schnitt durch GeoMol 17, Profil B zeigt die Interpretation des GA25 (JORDAN et al. 2011) und Profil C diejenige der Nagra (JORDAN et al. 2015).

(Kartenblatt 1089 Aarau, JORDAN et al. 2011; 1108 Murgenthal, JORDI et al. 2003 und GeoCover) sowie auf Bohrungen. Die modellierten Störungen umfassen die beiden süd-gerichteten Überschiebungen Born-Engelberg und Born-Kölliken sowie im Norden zwei kleinere, nordgerichtete Überschiebungen. Die Modellierung der zahlreichen kleineren Querstörungen wurde für GeoMol17 weggelassen.

Die Figur 6-10 zeigt anhand Profilen und Modellblöcken die modellierten Überschiebungsflächen. Der Blick von Südosten auf das Modell verdeutlicht den räumlichen Zusammenhang der Überschiebungen und den Übergang von einer Antiklinale in zwei Auffaltungen, die gegen Osten immer mehr verschwinden. Die modellierten stratigraphischen Horizonte wurden südlich und nördlich der Born-Engelberg-Störungszone in der Figur 6-10 zur besseren Veranschaulichung als Blockmodell dargestellt. Im Innern der Störungszone helfen Profilschnitte durch GeoMol17, den Verlauf der Störungen und die versetzten Horizonte darzustellen. Die Modelloberfläche entspricht dem Höhenmodell der Felsoberfläche und zeigt die anstehenden modellierten Lithologien ohne die überlagernden quartären Lockergesteine.

Durch die topographische Erhebung sind die geologischen Gegebenheiten der Born-Engelberg-Struktur an der Oberfläche ziemlich gut bekannt. Wegen der geringen Dattendichte ist ihr Verlauf in der Tiefe jedoch noch nicht vollständig geklärt. Die Figur 6-11 stellt die unterschiedliche Interpretation der Born-Engelberg-Struktur, basierend auf unterschiedlichen Datengrundlagen, dar. Die Profilschnitte liegen bei allen drei Profilen an der gleichen Stelle und zeigen A) einen Schnitt durch GeoMol17, B) die Interpretation des GA25 (JORDAN et al. 2011) und C) die Interpretation der Nagra (JORDAN et al. 2015). Der Unterschied zwischen Profil B und Profil C liegt hauptsächlich darin, dass die seismischen Daten der Etappe 1 des Sachplans Geologische Tiefenlager (NAGRA 2008) als Grundlage für das Profil des GA25 dienten. Das Profil C der Nagra beruht auf den verdichteten und neu tiefenmigrierten seismischen Daten der Etappe 2 des Sachplans Geologische Tiefenlager (NAGRA 2014).

Die strukturellen Unterschiede liegen vor allem darin, dass im Profil C durch neue Bohrungen eine bislang unbekannte Schuppe angebohrt wurde. Die «echte» Südüberschiebung der Born-Engelberg-Struktur auf das südliche Molassebecken wurde in den Etappe-2-Daten des Sachplans geologischer Tiefenlager weiter südlich interpretiert. Die wesentlichen Unterschiede befinden sich im Innern der Struktur. So wird im Profil B von einer Schichtverdoppelung im Muschelkalk ausgegangen. Im Profil C hingegen wird aufgrund von Überlegungen zur Profibilanzierung zur Diskussion gestellt, dass sich permische Sedimente eines ausgepressten Grabens im Kern der Antiklinale befinden könnten (JORDAN et al. 2015).

Für die Modellierung der Born-Engelberg-Störungszone wurde in GeoMol17 die Version des GA25 (B in Fig. 6-11) verwendet. Der Grund lag darin, dass bei der Anbindung des Modells hauptsächlich mit geologischen Karten und Profilen gearbeitet wurde (s. a. Kap. 5.3). Die neueren Daten der Etappe 2 (NAGRA 2014) wurden mit einem anderen Geschwindigkeitsmodell in Tiefe umgewandelt und liessen sich daher nicht auf die Mehrheit der anderen Datensätze abstimmen.

#### 6.2.1.4 St.-Gallen-Störungszone

Unmittelbar westlich der Stadt St. Gallen befindet sich die St.-Gallen-Störungszone, welche mehr als 30 km lang ist. Mittels einer detaillierten Interpretation eines neuen 3D-Seismikdatensatzes wurden in dieser Zone markante, NNE-SSW streichende Abschiebungen erkannt. Dabei wird der gesamte mesozoische Sedimentstapel um bis zu 300 m versetzt. Zudem weisen signifikante Mächtigkeitsänderungen in den mesozoischen Sedimenten entlang der St. Gallen-Störungszone auf wiederholte synsedimentäre Aktivität der Zone hin. Rezente natürliche und induzierte Erdbeben zeigen, dass die St.-Gallen-Störungszone momentan als sinistrale Blattverschiebung aktiv ist (HEUBERGER et al. 2016).

Wie in GeoMol15 wurde die St.-Gallen-Störungszone in GeoMol17 stark vereinfacht modelliert. Sie besteht aber im Gegensatz zu der einzelnen Störungsfläche aus GeoMol15 (Fig. 6-2, St.-Gallen-Romanshorn-Störungszone) aus den vier Störungsflächen Bruggen, Haggenschwil, Amriswil und Kesswil (Fig. 6-12). Diese Störungsflächen wurden basierend auf der leicht modifizierten Interpretation von ROTH et al. (2010) modelliert. Dies deshalb, da die Ergebnisse aus dem 3D-Seismikdatensatz des Geothermieprojekts der Stadt St. Gallen zum Zeitpunkt der Modellierung noch nicht alle zur Verfügung standen. Mithilfe der Daten aus dem 3D-Seismikdatensatz könnte das bestehende 3D-Modell in der Region St. Gallen zukünftig noch verfeinert werden.

Die Figur 6-12 gibt einen Einblick in das 3D-Modell im Umfeld der St.-Gallen-Störungszone. Die Ansicht ist dreigeteilt. Im westlichsten Teil der Ansicht sind der Basis-«Mesozoikum»-Horizont und die modellierten Störungsflächen dargestellt. Im mittleren Teil der Ansicht sind die mesozoischen Einheiten von Buntsandstein und Muschelkalk bis und mit unterer Malm als Blockmodell dargestellt. Zusätzlich sind die Molassehorizonte als Oberflächen und die Störungsflächen sichtbar. Die nördliche, westliche und südliche Begrenzung sind je eine Profilansicht. Auf der westlichen Profilansicht sind die Störungen der Triangelzone angedeutet. In diesem mittleren Teil der Figur 6-12 durchschneidet die Tiefbohrung St. Gallen die obersten Horizonte sowie die Störungsflächen der Triangelzone und endet an der Störung Bruggen. Im östlichsten Teil der Ansicht sind ein Blockmodell aller modellierten Schichten sowie die modellierten Störungen der Triangelzone zu sehen. Die Störungsflächen der Abschiebungen Bruggen, Haggenschwil und Amriswil streichen SSW-NNE und versetzen den mesozoischen Sedimentstapel von der Basis «Mesozoikum» bis zur Basis «Känozoikum» in Richtung ESE. Die Störungsfläche Bruggen zieht von NNE her unter die basale Überschiebung der Triangelzone. Sie wurde abweichend von der Interpretation von ROTH et al. (2010) nach Südwesten verlängert. Begründet ist dies durch einen zusätzlichen Befund auf einer weiteren seismischen Sektion, welche nicht in die erwähnte Studie einbezogen worden war. Die Lage der Tiefbohrung St. Gallen bestätigt, dass ein lineares Verbinden der interpretierten Störungen auf der seismischen Sektion die tatsächliche Störungsfläche stark vereinfacht. Deshalb wurde unter Einbezug der Bohrdaten die Störungsfläche Bruggen so modelliert, dass die Basis der

## St.-Gallen-Störungszone

GeoMol 17

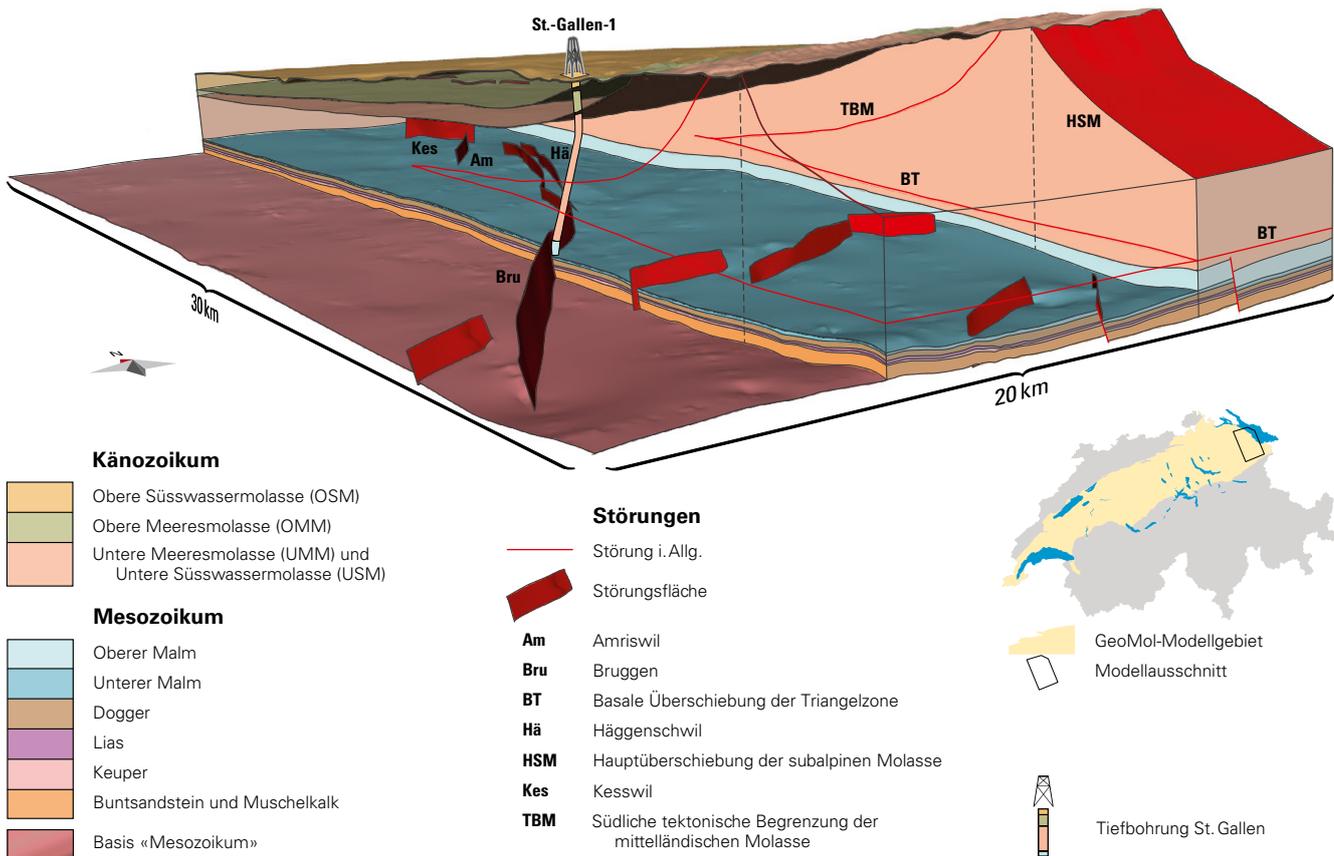


Fig. 6-12: Einblick in das 3D-Modell GeoMol17 im Umfeld der St.-Gallen-Störungszone. Diese besteht aus mehreren Abschiebungen (s. Beschreibung im Text).

Bohrung, entsprechend der Bohraufnahme, im Liegenden endet (HUGGENBERGER et al. 2016).

Im Unterschied zu den Strukturkarten von ROTH et al. (2010) wurde der nördlichste Teil der östlichen Störungsfläche abgetrennt und als eigenständige Störungsfläche modelliert. Diese Abtrennung der Störung Kesswil von der Störung Häggenschwil entspricht der Interpretation der seismischen Sektionen der Nagra in der Region (HUGGENBERGER et al. 2016). Die modellierte Störungsfläche der Abschiebung Kesswil streicht SE-NW und versetzt sowohl den mesozoischen Sedimentstapel als auch das Top der Unteren Süßwassermolasse und das Top der Oberen Meeresmolasse in Richtung Nordosten. Zwei weitere Abschiebungen oberhalb der Störungsfläche Häggenschwil streichen ebenfalls SE-NW, versetzen jedoch nur die beiden Molassehorizonte Top USM und Top OMM in Richtung Nordosten.

### 6.2.1.5 Störungszonen in der Region des Nordschweizer Permokarbondrogs

Der Nordschweizer Permokarbondrog zieht vermutlich durch die ganze Nordschweiz, von der Ajoie bis zum Bodensee (DIEBOLD et al. 1991). In GeoMol17 wurde ein Teil des Nordschweizer Permokarbondrogs in der Region Aarau-Laufenburg-Benken-Winterthur modelliert. Da für die Model-

lierung des Horizont Basis «Permokarbondrog» aufgrund fehlender Intervallgeschwindigkeiten keine tiefenkonvertierten seismischen Interpretationen vorhanden sind (Kap. 5.3.5.4), sind die Höhen des modellierten Nordschweizer Permokarbondrogs und dessen Störungen mit Unsicherheit behaftet. Dieses Modell sollte deshalb nur für Visualisierungszwecke genutzt werden.

Die Figur 6-13 gibt einen Einblick in das 3D-Modell des Nordschweizer Permokarbondrogs. Das durchgehende Schichtmodell wurde aufgeschnitten, gezeigt werden die modellierten Horizonte Basis «Permokarbondrog» und Basis «Mesozoikum», letzterer jedoch nur im östlichsten Modellsegment. Ebenfalls dargestellt sind die modellierten Störungen und fünf aus dem 3D-Modell generierte Profilschnitte. Diese NNW-SSE-orientierten Profile zeigen die zehn modellierten Horizonte und die angeschnittenen Störungen.

Trograndzonen entsprechen einem Übergangsbereich zwischen dem zentralen, tiefen Permokarbondrog und den weniger tiefen Trogschultern (NAGRA 2014). Der zentrale Permokarbondrog erreicht gemäss der für die Modellierung des Horizonts Basis «Permokarbondrog» durchgeführten, einfachen Tiefenumwandlung eine Maximaltiefe von knapp -4000 m ü.M. Generell nimmt dessen Tiefe von Westen her bis zum mittleren Profilschnitt leicht ab und gegen Osten

# Nordschweizer Permkarbondrog

GeoMol 17

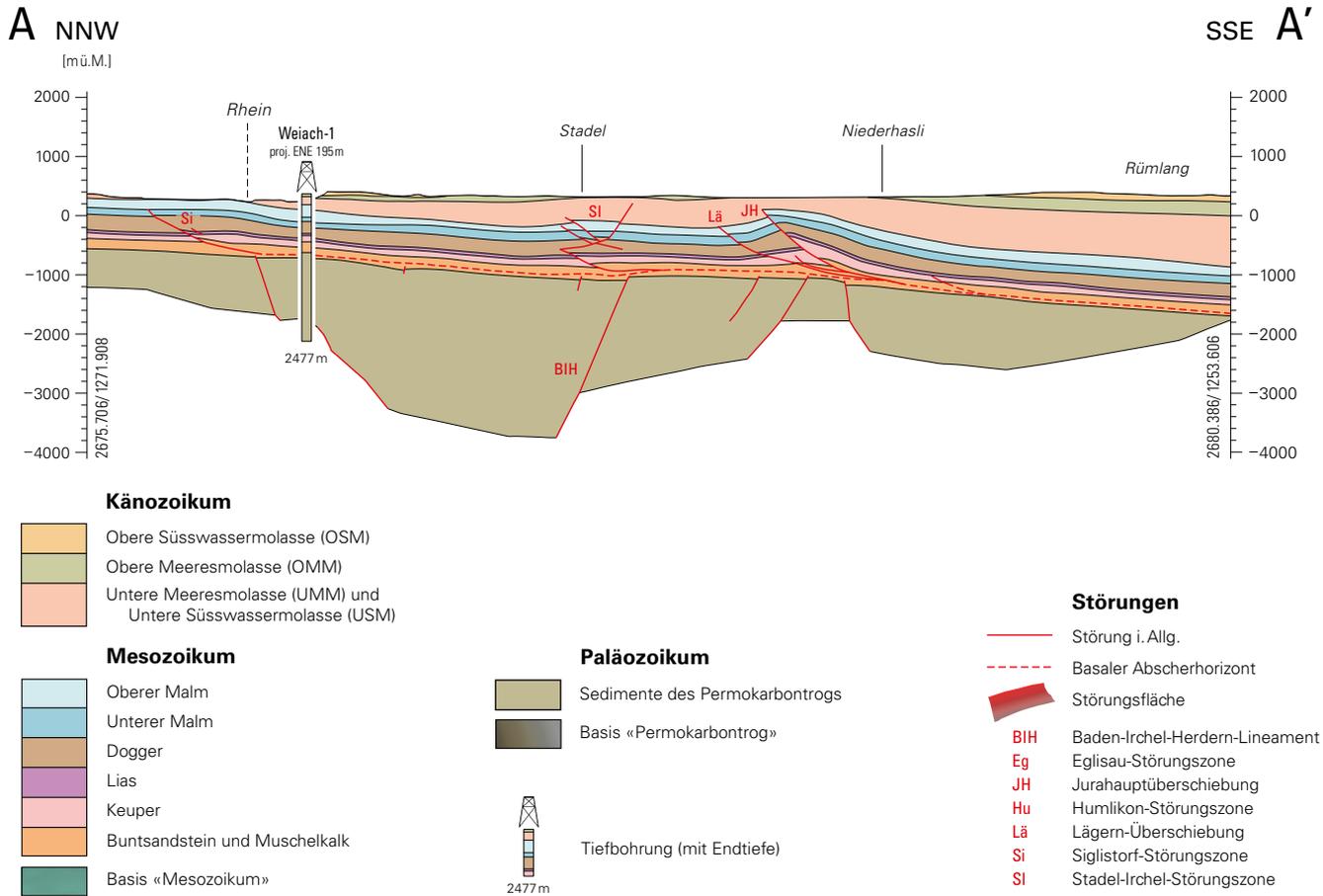
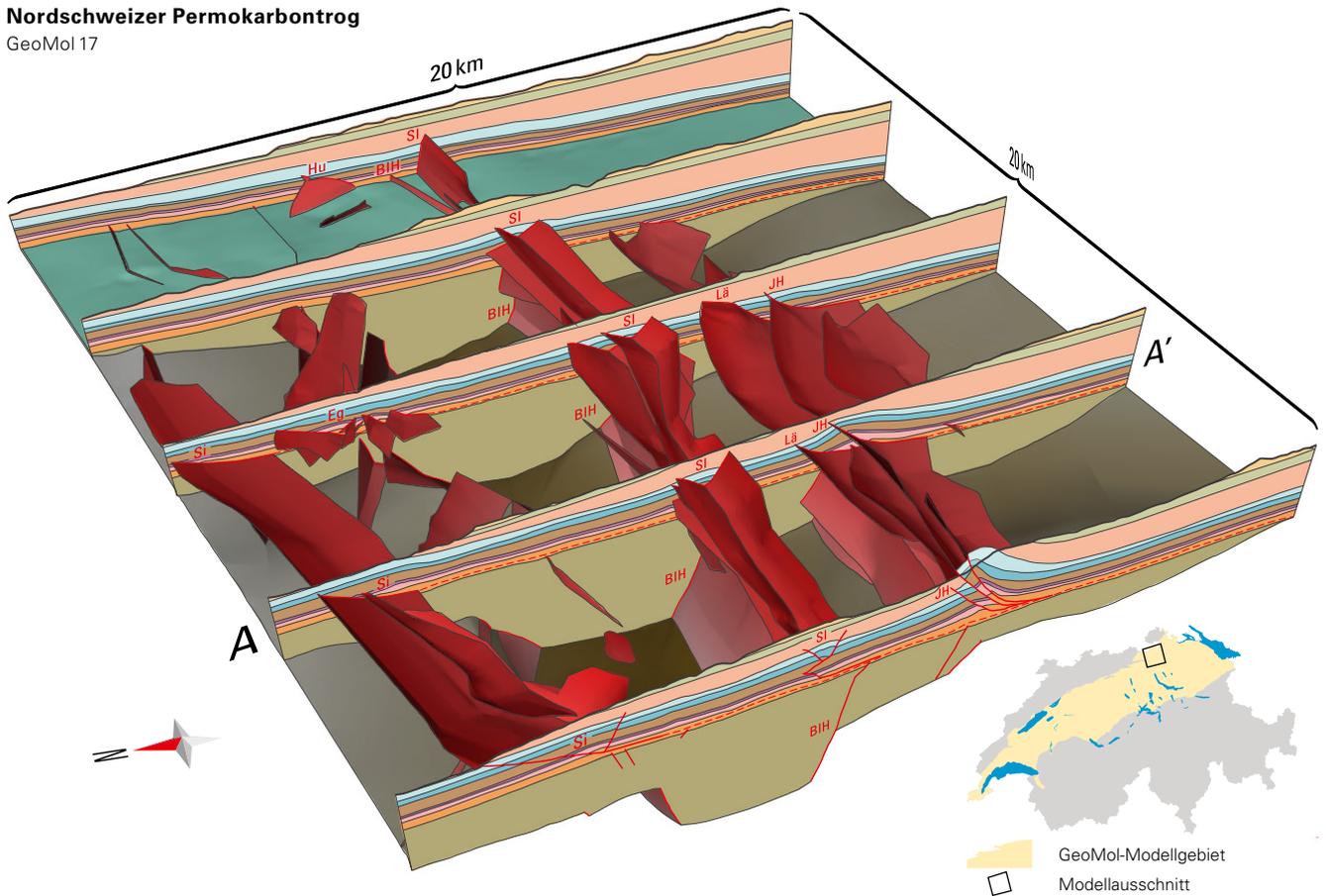


Fig. 6-13: Einblick in das 3D-Teilmodell des Nordschweizer Permkarbondrogs (GeoMol17), mit eingeblendeten, aus dem Modell generierten Profilschnitten. Das Profil A-A' wird zudem als gewohnte Profilsicht dargestellt (s. Beschreibung im Text).

## Baden-Irchel-Herdern-Lineament

Konzeptionelle Störungsentwicklung

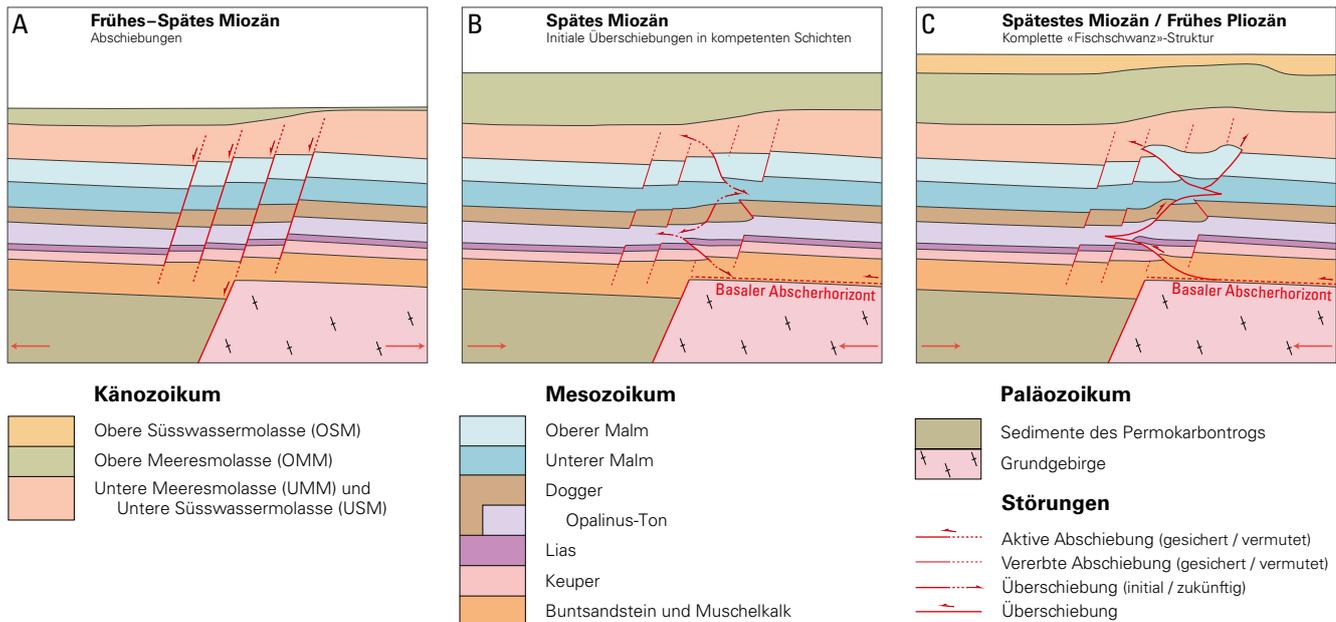


Fig. 6-14: Konzeptionelle Störungsentwicklung der «Fischschwanz»-Struktur der Stadel-Irchel-Antiklinale im Einflussbereich des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments. A) Abschiebungen: Extensionsstrukturen, die zu einer mechanischen Schwachstelle im Sedimentstapel führen. B) Initiale Ausbildung von Überschiebungsrampen in den kompetenten Schichten, die in Flachbahnen innerhalb von inkompetenten Schichten münden. C) Komplette «Fischschwanz»-Struktur. Einige der Überschiebungen entstanden durch die Reaktivierung von präexistierenden Abschiebungen (MALZ et al. 2016, überarbeitet).

wieder zu. Die Breite des zentralen Trogs nimmt gegen Osten hin stetig ab. Im Süden wird der zentrale Permokarbondrog durch das Baden-Irchel-Herdern-Lineament begrenzt. Es handelt sich hier um eine im Grundgebirge wurzelnde Abschiebung (JORDAN et al. 2015, MALZ et al. 2016), welche auch den Basis-«Mesozoikum»-Horizont versetzt.

Oberhalb der nördlichen Randzone des zentralen Permokarbondrogs befindet sich die Siglistorf-Störungszone. Diese erstreckt sich ungefähr WSW-ENE streichend von Lengnau über Siglistorf bis Rafz und besteht aus mehreren Überschiebungs- und Rücküberschiebungsflächen, welche die Siglistorf-Antiklinale ausbilden.

Etwas weiter südöstlich befindet sich die Eglisau-Störungszone, welche sich über mehrere Kilometer von Eglisau im Westen ungefähr WNW-ESE streichend nach Osten erstreckt (JORDAN et al. 2015). Sie besteht im westlichsten Teil ebenfalls aus mehreren Überschiebungs- und Rücküberschiebungsflächen. Gegen Osten wurde die nördlichste als längste Überschiebungsfläche modelliert. Die Eglisau-Störungszone scheint mit einem Sockelsprung zusammenzuhängen (MADRITSCH et al. 2013).

Über dem Baden-Irchel-Herdern-Lineament bildete sich in den mesozoischen Sedimenten die komplexe Stadel-Irchel-Störungszone mit sowohl nord- als auch südvergente Überschiebungen. Durch diese «Fischschwanz»-Struktur wird die Stadel-Irchel-Antiklinale gebildet.

Südlich davon befindet sich die Jurahauptüberschiebung, welche in GeoMol17 aus drei Überschiebungsflächen besteht. In Richtung Osten werden diese allmählich von der Lägern-Überschiebung abgelöst. Zusammen bilden diese

Überschiebungen den östlichsten oberflächlich sichtbaren Ausläufer des Faltenjuras, die Lägern-Antiklinale (BITTERLI-DREHER et al. 2007), welche in den beiden westlichen Profilen noch erkennbar ist und im mittleren Profil verschwindet. Der Verlauf der Überschiebungen, welche die Lägern-Antiklinale bilden, scheint ebenfalls mit einem Sockelsprung zusammenzufallen (JORDAN et al. 2015).

Der basale Abscherhorizont in den triassischen Sedimenten ist in den Profilen gestrichelt eingezeichnet, wurde aber nicht modelliert. In 3D ist es gerade in diesem Gebiet schwierig, diesen Horizont und vor allem seine Begrenzung zu modellieren, da es dazu nur sehr wenige Anhaltspunkte gibt. Ausserdem gibt es Anzeichen für zusätzliche Abscherhorizonte in weiteren inkompetenten Schichten (s. Diskussion zu Fig. 6-14).

### Profil A-A'

Das etwa 19 km lange NNW-SSE streichende Profil A-A' (Fig. 6-13) erstreckt sich von nördlich des Rheins über Stadel, Neerach und Niederhasli bis östlich Rümlang. Die Tiefbohrung Weiach-1 wurde 195 m weit von ENE auf die Profilebene projiziert. Die Mächtigkeit der modellierten Horizonte bleibt mehr oder weniger gleich, ausser bei den Störungszonen. Der hier vermutete zentrale Permokarbondrog erreicht in diesem Profil eine Tiefe von knapp -3700 m ü.M.

Die Überschiebungsfläche der Siglistorf-Störungszone befindet sich oberhalb der nördlichen Begrenzung des zentralen Permokarbondrogs und wird in diesem Profil als nördliche Begrenzung des basalen Abscherhorizonts dargestellt.

Weiter südöstlich durchschneidet das Profil die «Fischschwanz»-Struktur der Stadel-Irchel-Störungszone. Diese befindet sich oberhalb des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments, dem vermutlichen Südrand des zentralen Permokarbons, dem vermutlichen Südrand des zentralen Permokarbons.

Gut erkennbar ist die Aufwölbung der mesozoischen Sedimente bei der Lägern-Antiklinale durch die Juraüberschiebung und die Lägern-Überschiebung. Darunter ist der zuvor erwähnte Sockelsprung zu erkennen.

Die Stadel-Irchel-Störungszone wurde in der Seismik als eine «Fischschwanz»-Struktur interpretiert (MADRITSCH et al. 2013, MEIER et al. 2014) und in GeoMol17 auch so modelliert (Fig. 6-13). Die Figur 6-14 zeigt eine mögliche Entwicklung dieser «Fischschwanz»-Struktur oberhalb des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments, entsprechend der Interpretation von MALZ et al. (2016).

Gemäss empirischen Beobachtungen in anderen Überschiebungsgürteln (z.B. DROZDZEWSKI 1979, SANS & VERGÉS 1995) implizieren derartige «Fischschwanz»-Strukturen das Vorhandensein von sekundären Abscherhorizonten (MADRITSCH et al. 2013). Dass sich die Abscherung zwischen der Stadel-Irchel-Antiklinale und dem Nordrand des Kettenjuras bei Dielsdorf auf verschiedene Stockwerke im Mesozoikum verteilen muss, wurde bereits von DIEBOLD et al. (1991) beobachtet.

Ausserdem weist das räumliche Zusammenfallen der Stadel-Irchel-Störungszone mit der älteren und mehrfach reaktivierten Abschiebung des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments (Fig. 6-14A) darauf hin, dass letzteres einen wesentlichen Einfluss auf die geometrische Ausbildung und kinematische Entwicklung der komplexen «Fischschwanz»-Struktur hat (MADRITSCH et al. 2013, MALZ et al. 2016).

In dieser mechanisch beanspruchten und vorgeprägten Zone entwickeln sich in den kompetenten Schichten kurze initiale Überschiebungsrampen (Fig. 6-14B), welche sich in die inkompetenteren Schichten fortsetzen und so während der anhaltenden Verkürzungsphase im Opalinus-Ton, der Wildegg-Formation und an der Basis der Unteren Süsswassermolasse sekundäre Abscherhorizonte bilden (MALZ et al. 2016).

Die ausgebildete «Fischschwanz»-Struktur wurzelt in den basalen Abscherhorizont in den triassischen Sedimenten und schneidet den Keuper und den Lias in Form einer nordvergenten Überschiebung. Im Opalinus-Ton wurzelt eine südvergente Rücküberschiebung, welche die höheren jurassischen Einheiten schneidet und in eine «Pop-up»-Struktur mündet. Diese wird aus einer in den unteren Malm wurzelnden nord- und einer südvergenten Überschiebung aufgebaut (Fig. 6-14C, JORDAN et al. 2015).

## 6.2.2 Horizonte

Im Rahmen von GeoMol17 wurden insgesamt 14 geologische Horizonte basierend auf den bestehenden Grundlagedaten modelliert (Kap. 3 u. Kap. 4). Diese unterscheiden sich von den Resultaten von GeoMol15 sowohl im Detaillierungsgrad als auch aufgrund höherer Datendichte. Ausserdem wurde für die Tiefenumwandlung der seismischen Daten eigens ein neueres Geschwindigkeitsmodell (Kap. 5.3.4) erstellt.

Aus den modellierten Horizonten konnte die Mächtigkeit der zugehörigen lithostratigraphischen Einheiten abgeleitet werden. Nachfolgend werden zu den modellierten

Horizonten jeweils die Höhenmodelle der Oberflächen und/oder die Mächtigkeitskarten der Einheiten dargestellt und beschrieben. Figuren der Höhenmodelle aller modellierten Horizonte und der Mächtigkeitskarten der dazugehörigen Einheiten finden sich in grösseren Formaten auf dem beiliegenden Datenträger.

### 6.2.2.1 Felsoberfläche

Das Höhenmodell der Felsoberfläche (Fig. 6-15) besteht aus einem Raster mit einer Zellengrösse von 25 m. Die Mächtigkeitskarte der quartären Lockergesteine (Fig. 6-16) ist ein abgeleitetes Produkt der modellierten Felsoberfläche (Topographisches Höhenmodell minus Höhenmodell Felsoberfläche). Dieses Raster besitzt ebenfalls eine Maschenweite von 25 m.

Das Höhenmodell der Felsoberfläche und die Mächtigkeitskarte der quartären Lockergesteine wurden über das Schweizer Molassebecken hinaus modelliert. Es fehlen einzig die Kantone Basel-Landschaft, Basel-Stadt und Jura sowie Teile von Graubünden und Solothurn.

Die meisten der tief in die Felsoberfläche eingeschnittenen Rinnen, und die meistens damit assoziierte grosse Mächtigkeit der quartären Lockergesteine, liegen im Bereich der heutigen grossen Täler mit wichtigen Flussläufen und Seen. Diese Verteilung widerspiegelt die erhöhte Erosion während der verschiedenen pleistozänen Gletschervorstösse in die Alpentäler und das alpine Vorland.

Die Tiefe der Felsoberfläche reicht in den grossen Alpentälern (Rhone, Aare, Reuss, Linth, Rhein, Tessin) bis unter den heutigen Meeresspiegel. Im Schweizer Mittelland sind die Übertiefungen etwas weniger stark ausgeprägt. Die Mächtigkeit der quartären Lockergesteine beträgt aber auch dort bis zu mehrere hundert Meter.

Die Mächtigkeitskarte der quartären Lockergesteine (Fig. 6-16) muss jedoch mit Vorbehalt betrachtet werden. In Gebieten, wo heute Seen sind, ist die berechnete Mächtigkeit zu gross. Der Grund dafür ist, dass im topographischen Höhenmodell DHM25 die Seeoberfläche abgebildet ist und nicht der Seegrund. Deshalb müsste bei den Seen die Wassertiefe von der berechneten Mächtigkeit subtrahiert werden, damit sie mit der Mächtigkeit der Lockergesteine übereinstimmt.

### 6.2.2.2 Molassehorizonte

Die Untere Süsswassermolasse (USM), die Obere Meeresmolasse (OMM) und die Obere Süsswassermolasse (OSM) sind im Schweizer Molassebecken aufgeschlossen (Fig. 6-17) und mancherorts erodiert. Die Untere Meeresmolasse (UMM) wurde im Schweizer Molassebecken (exkl. subalpine Molasse) nur in sehr wenigen Tiefbohrungen angetroffen (SOMMARUGA et al. 2016).

In GeoMol17 wurden, wo möglich, alle vier Molassehorizonte Top UMM, Top USM, Top OMM und Top OSM modelliert. Im Folgenden werden die Höhenmodelle kurz beschrieben; entsprechende Karten sind auf dem beiliegenden Datenträger gespeichert.

Der Top-UMM-Horizont konnte nicht überall modelliert werden, da zu wenige Informationen bezüglich dieser

### Höhenmodell

Felsoberfläche GeoMol17

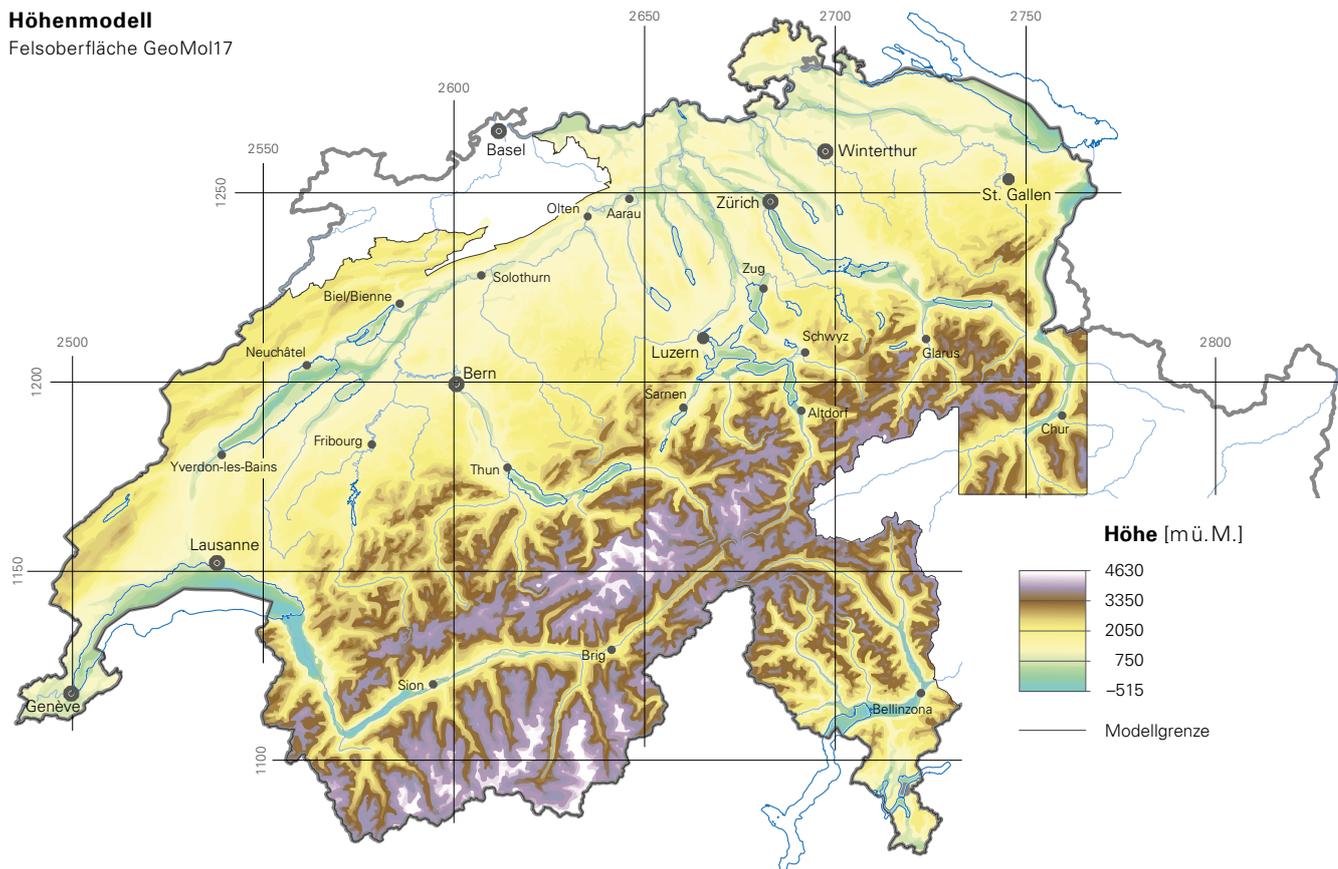


Fig. 6-15: Höhenmodell der Felsoberfläche (Zellengrösse 25 x 25 m).

### Mächtigkeitkarte

Quartäre Lockergesteine GeoMol 17

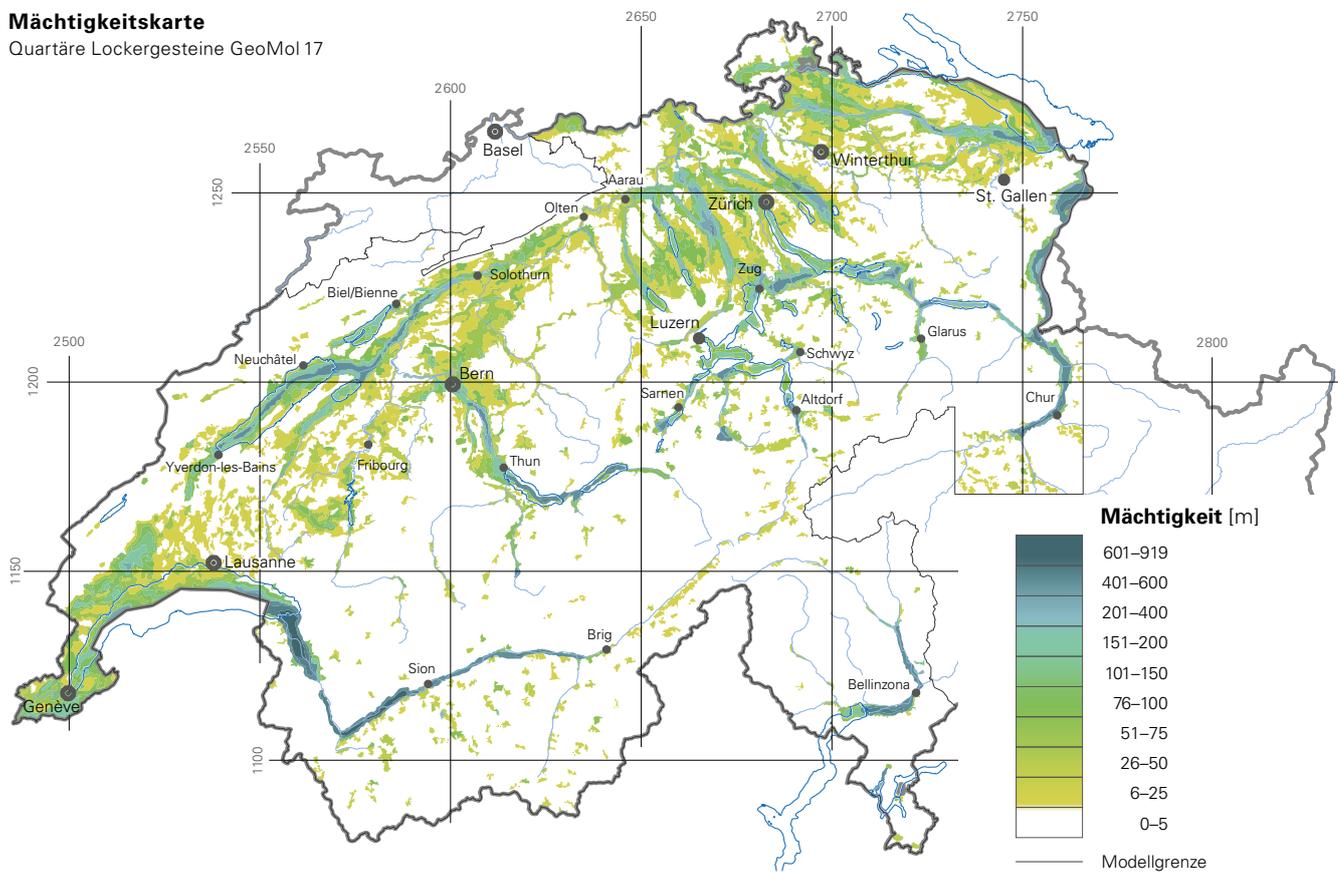


Fig. 6-16: Mächtigkeitkarte der quartären Lockergesteine; ein abgeleitetes Produkt der modellierten Felsoberfläche (Fig. 6-15).

## Höhenmodell

Felsoberfläche GeoMol 17

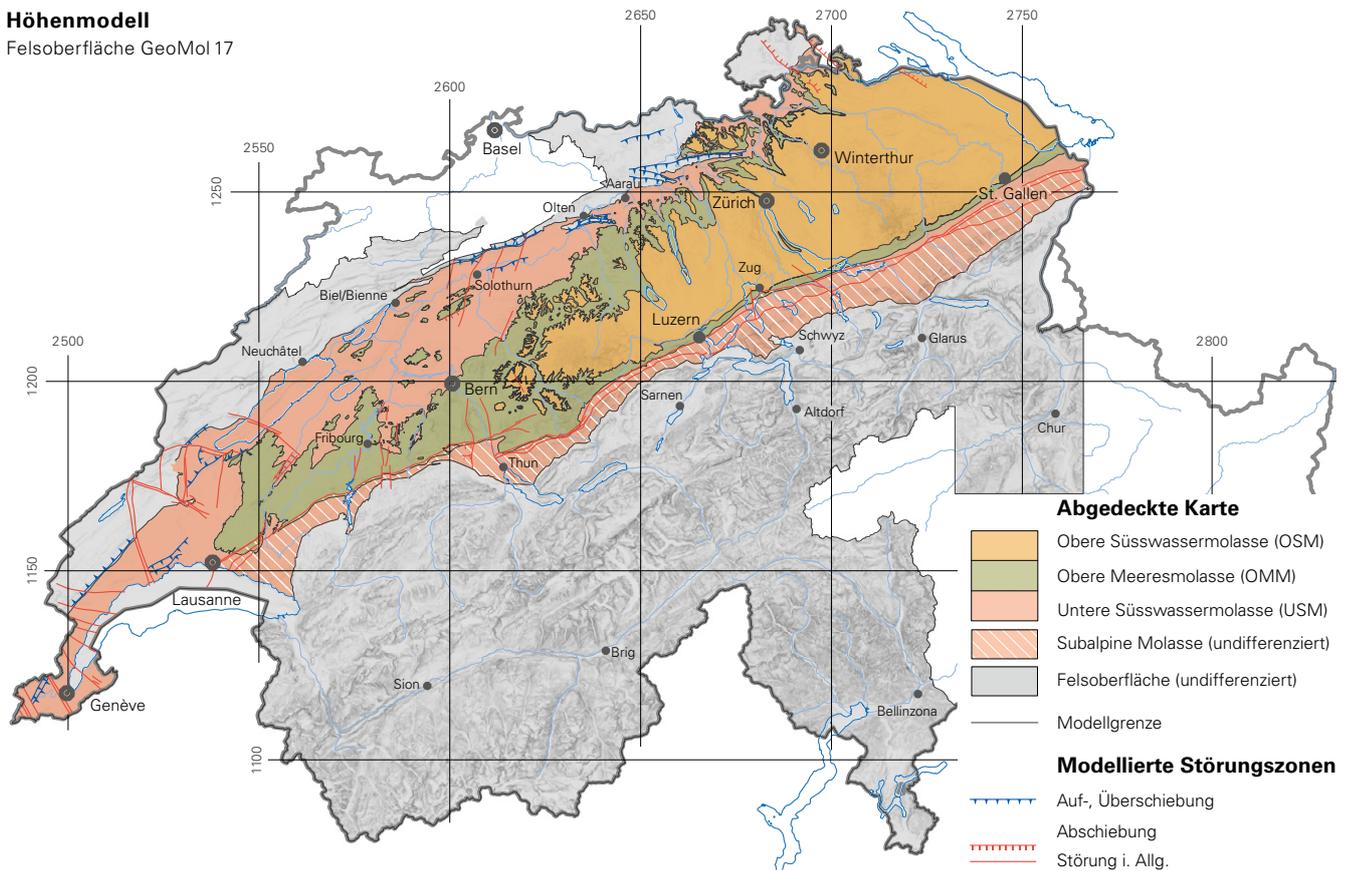


Fig. 6-17: Höhenmodell der Felsoberfläche mit der Zuteilung der Molasse-Einheiten; entspricht der aus dem Modell generierten abgedeckten Karte.

Einheit vorhanden sind. Er wurde nur in der Modellregion der Teilmodelle Waadt und Freiburg modelliert. Das Höhenmodell Top UMM erstreckt sich somit vom Genfersee im Westen bis in das Gürbetal im Osten und zeigt ein regelmässiges Einfallen in Richtung Südosten. Es befindet sich in Höhenlagen von -1150 m ü. M. bei Lausanne bis -4630 m ü. M. an der alpinen Front. Die Untere Meeresmolasse (UMM) keilt auf einer Linie Lausanne-Freiburg auf dem Basis-«Känozoikum»-Horizont aus.

Das Höhenmodell des erodierten Top-USM-Horizonts entspricht dem Höhenmodell der Felsoberfläche. Das nicht erodierte Top USM erreicht Höhen zwischen etwa 1500 m ü. M. und -870 m ü. M. Das Höhenmodell des erodierten Top-OMM-Horizonts entspricht ebenfalls dem Höhenmodell der Felsoberfläche. Das nicht erodierte Top OMM erreicht Höhenwerte zwischen etwa 1250 m ü. M. und -350 m ü. M.

In den Höhenmodellen der Horizonte Top USM und Top OMM ist das generelle Einfallen in Richtung Südosten der flachliegenden mittelländischen Molasse erkennbar. Gegen die Triangelzone und die subalpine Molasse hin richtet sich die mittelländische Molasse auf. In beiden Höhenmodellen widerspiegeln sich die Faltenachsen im Schweizer Molassebecken. So werden die tiefsten Stellen des Top-USM-Horizonts durch Synklinalen zwischen Luzern und Zug beziehungsweise beim Zürichsee gebildet. Die Höhenwerte der beiden Höhenmodelle nehmen generell in Richtung Bodensee ab.

Da die Obergrenze der OSM überall erosiv ist, entspricht der Top-OSM-Horizont, dort wo er vorkommt, dem Höhenmodell der Felsoberfläche.

Die Gesamtmächtigkeit der känozoischen Sedimente nimmt von 0 m entlang des Juras in Richtung Südosten bis über 5500 m im Bereich der subalpinen Molasse markant zu (s. a. Kap. 6.1.2.2). Lokal treten kleinere Mächtigkeitschwankungen aufgrund von Erosion auf.

### 6.2.2.3 Mesozoische Horizonte

Die Höhenmodelle der Horizonte aus GeoMol17 von Basis «Känozoikum» bis Basis «Mesozoikum» zeigen beckenweit ein regelmässiges Einfallen in Richtung Südosten. Die Isolinien streichen SW-NE. Der Einfallswinkel variiert zwischen etwa 3° und 6°. Im Folgenden werden die Höhenmodelle der Horizonte kurz beschrieben; entsprechende Karten sind auf dem beiliegenden Datenträger gespeichert.

Je nach Modellierregion (s. a. Kap. 1.3) und Vorgehensweise bei der Modellierung sehen die Horizonte unterschiedlich aus. So wurde beispielsweise der Versatz der Horizonte bei Störungen in einigen Modellgebieten als Stufen, in anderen als ausgeschnittene Störungspolygone modelliert (s. a. Kap. 5.3). Ausserdem wird hier nochmals darauf hingewiesen, dass vor dem Grenzabgleich zwischen den einzelnen Horizonten der Teilmodelle (Kap. 5.3.7 u. Kap. 6.2.3) Höhenunterschiede von bis zu mehreren hundert

Metern bestanden. Diese sind in den finalen Horizonten nicht zu erkennen, da diese mit dem Grenzabgleich durchgehend harmonisiert wurden.

#### ***Höhenmodell Basis «Känozoikum»***

Der Basis-«Känozoikum»-Horizont ist die Trennfläche zwischen den känozoischen und den mesozoischen Sedimenten. Sie ist am Nordrand des heutigen Schweizer Molassebeckens aufgeschlossen. Die Höhen reichen von etwa 1600 m ü. M. bis -5100 m ü. M. Dies widerspiegelt die Gesamtmächtigkeit der känozoischen Sedimente (s. a. Kap. 6.1.2.2).

Im Westen sind deutlich die Versätze durch markante Blattverschiebungen (z.B. Pontarlier-Vallorbe-Aubonne-, La-Sarraz-, Baulmes-Chamblon-Störungszone, s. a. Kap. 6.2.1.1) zu erkennen. Weiter in Richtung Osten dominieren am Nordrand des Höhenmodells (südlich des Faltenjuras zwischen Biel und Bülach) Faltenstrukturen, welche in der Regel mit Überschiebungen oder Rücküberschiebungen einhergehen. Im Nordosten wird das Höhenmodell durch zwei abschiebende Störungszonen (Neuhausen und Randen) versetzt. Südlich davon erkennt man einen leichten Versatz, welcher sich von den Lägern im Westen bis beinahe zum Bodensee im Osten erstreckt. Dieser hängt mit der Störungszone Stadel-Irchel, welche mit dem Baden-Irchel-Herdern-Lineament assoziiert ist, zusammen. Am Südrand des Höhenmodells sind einige Abschiebungen zu erkennen.

#### ***Höhenmodell Top «Kreide»***

Die Sedimente der Kreide kommen nur westlich der Linie Biel-Thun vor. Dort entspricht das Höhenmodell Top «Kreide» dem Höhenmodell Basis «Känozoikum». Die Höhen reichen von etwa 1600 m ü. M. bis -5100 m ü. M.

#### ***Höhenmodell Top oberer Malm***

Das Höhenmodell Top oberer Malm entspricht westlich der Linie Biel-Thun dem nicht erodierten Top des oberen Malms (Basis «Kreide»), ist östlich dieser Linie erodiert und entspricht dort dem Höhenmodell Basis «Känozoikum». Die Höhen reichen von etwa 1400 m ü. M. bis -5100 m ü. M. Die Strukturen, welche im Höhenmodell Basis «Känozoikum» sichtbar sind, sind auch hier erkennbar.

#### ***Höhenmodell Top unterer Malm***

Die Höhen im Höhenmodell Top unterer Malm reichen von etwa 1400 m ü. M. bis -5500 m ü. M. Die Strukturen, welche im Höhenmodell Basis «Känozoikum» sichtbar sind, werden auch hier widerspiegelt.

#### ***Höhenmodell Top Dogger***

Die Figur 6-18 zeigt das Höhenmodell Top Dogger aus GeoMol17. Die Höhen reichen von etwa 1300 m ü. M. bis -5700 m ü. M. Im Westen dominieren die Blattverschiebungen (s. a. Kap. 6.2.1.1). Südlich des Faltenjuras, zwischen Biel und Bülach, sind die Faltenstrukturen, welche grösstenteils mit Überschiebungen oder Rücküberschiebungen einhergehen, zu erkennen. Im Nordosten versetzen zwei Abschie-

bungen das Höhenmodell. Südlich davon ist ein Versatz im Zusammenhang mit der Störungszone Stadel-Irchel, die mit dem Baden-Irchel-Herdern-Lineament assoziiert wird, zu sehen. Im Süden des Höhenmodells sind die Blattverschiebungen im Gürbe- und Aaretal ersichtlich. Ausserdem versetzen zwischen Thun und Luzern, aber auch südlich von St. Gallen, weitere Abschiebungen das Höhenmodell.

#### ***Höhenmodell Top Lias***

Das Höhenmodell Top Lias zeigt Höhen von etwa 1200 m ü. M. bis -5800 m ü. M. Die Strukturen, welche im Höhenmodell Top Dogger beschrieben sind, sind auch hier sichtbar.

#### ***Höhenmodell Top Keuper***

Die Höhen des Höhenmodells Top Keuper reichen von etwa 1100 m ü. M. bis -5900 m ü. M. mit einem regelmässigen Einfallen in Richtung Südosten. Die Strukturen, welche im Höhenmodell Top Dogger beschrieben sind, sind auch hier zu erkennen.

#### ***Höhenmodell Top Muschelkalk***

Das Höhenmodell des Top-Muschelkalk-Horizonts zeigt ein regelmässiges Einfallen in Richtung Südosten mit Höhen von etwa 500 m ü. M. bis -6100 m ü. M. Im Westen gleicht das Höhenmodell nicht mehr den darüber liegenden Horizonten. Da sich dort der basale Abscherhorizont in den Evaporiten des Keupers befindet und einige Störungen in diesen wurzeln, wurde der Top-Muschelkalk-Horizont tektonisch weniger stark überprägt. Auch die meisten Faltenstrukturen, welche in den darüber liegenden Horizonten sichtbar sind, beeinflussen diesen Horizont nicht (CLERC 2016, MARCHANT & BAUER 2016). Weiter östlich widerspiegeln sich die Strukturen, welche im Höhenmodell Top Dogger beschrieben sind.

#### ***Höhenmodell Basis «Mesozoikum»***

Das Höhenmodell Basis «Mesozoikum» zeigt ebenfalls ein regelmässiges Einfallen in Richtung Südosten. Die Höhenwerte reichen von etwa 600 m ü. M. bis -6700 m ü. M. Im Westen sind wie im Höhenmodell Top Muschelkalk nur noch wenige Störungsversätze vorhanden. Ausserdem existieren am Nordrand keine Faltenstrukturen mehr, da sich der basale Abscherhorizont dort im Muschelkalk befindet. Im Nordosten sind verschiedene Abschiebungen sichtbar, welche zum Teil als Trograndstörungen des Permokarbondrogs modelliert wurden, wie beispielsweise das Baden-Irchel-Herdern-Lineament (s. a. Kap. 6.2.1.5). Im Süden des Höhenmodells sind zwischen Thun und Luzern, aber auch südlich von St. Gallen, Abschiebungen sichtbar.

#### ***Höhenmodell Basis «Permokarbondrog»***

Der Horizont Basis «Permokarbondrog» wurde nur in der Region Aarau-Laufenburg-Benken-Winterthur modelliert. Er ist Teil des Nordschweizer Permokarbondrogs (s. a. Kap. 6.2.1.5). Die Höhen reichen von etwa 200 m ü. M. bis -5100 m ü. M.

### Höhenmodell

Top Dogger GeoMol17

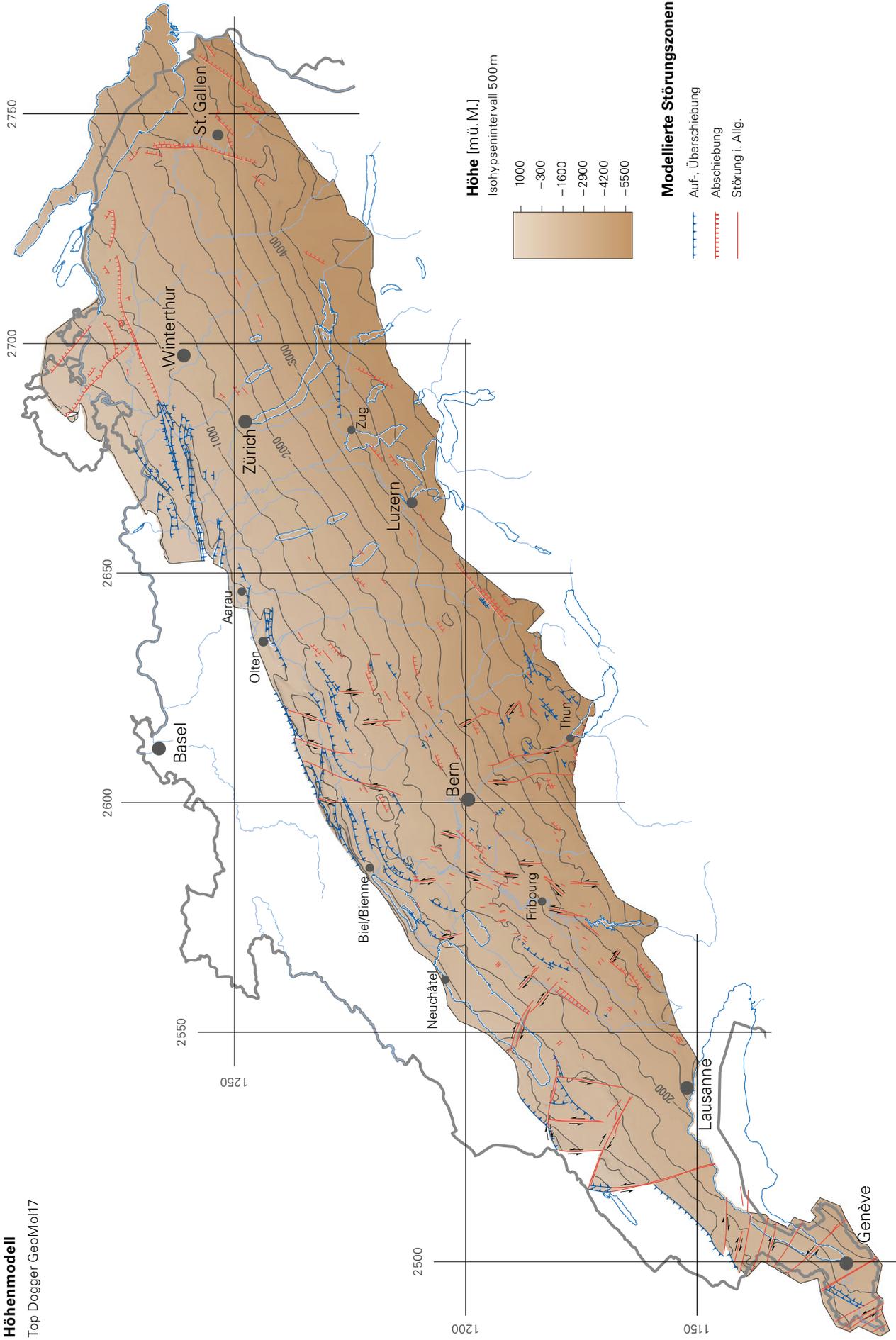


Fig. 6-18: Höhenmodell Top Dogger aus GeoMol17 mit den Störungszonen, welche den Horizont schneiden (s. Beschreibung im Text).

### **Gesamtmächtigkeit der mesozoischen Einheiten**

Die Gesamtmächtigkeit der mesozoischen Einheiten nimmt von über 3500 m bei Genf auf etwa 2500 m bei Freiburg bis weniger als 1000 m in der Ostschweiz ab (s. a. Kap. 6.1.2.3). Nachfolgend wird kurz auf die Mächtigkeit der einzelnen lithostratigraphischen Einheiten eingegangen; die Karten sind auf dem beiliegenden Datenträger gespeichert. In den Berichten zu den Teilmodellen Genf (CLERC 2016), Waadt (MARCHANT & BAUER 2016), Freiburg (GRUBER et al. 2013) und Bern (MOCK 2016) wurden die Mächtigkeitskarten der einzelnen Einheiten diskutiert. Diese Diskussionspunkte werden im Folgenden kurz wiedergegeben.

Die Mächtigkeitskarten wurden in Move™ als stratigraphische Mächtigkeit berechnet. Dabei wurde die Höhendifferenz zwischen zwei übereinanderliegenden Horizonten senkrecht zur oberen Horizontfläche in jedem Flächennetzpunkt erfasst (im Gegensatz zur vertikalen Mächtigkeit). Die berechnete Mächtigkeit kann jedoch durch tektonische Strukturen beeinflusst werden und nicht nur rein stratigraphisch bedingt sein. Beispielsweise bei Verdoppelungen der Schichten durch Überschiebungen konnte kein Unterschied zur stratigraphischen Mächtigkeit gemacht werden.

Die Mächtigkeitskarten wurden auch als Qualitätskontrolle verwendet (s. a. Kap. 5.3.4.1 u. Kap. 7.1), damit artifizielle oder natürliche Mächtigkeitsanomalien entdeckt werden konnten. So werden im Generellen Variationen im seismischen Abbild (z.B. Qualität oder lateral diskontinuierliche bzw. kontinuierliche Reflektoren) direkt in die Variationen der finalen Horizontfläche übertragen (MOCK 2016). Andere artifizielle Mächtigkeitsanomalien zeigen zum Beispiel in der Profilansicht eine «Boudinage» von Einheiten. Dies kann in der Nähe einer Bohrung geschehen, wo dieselbe Einheit verdoppelt vorkommt, im Modell diese Verdoppelung aber vereinfacht wird und nur das Top und die Basis in allen Daten interpoliert werden. So dünnt die Einheit neben der Bohrung wieder aus. Dieser Effekt stammt teilweise auch aus der Art der Modellierung.

Bei der datentreuen Modellierung werden die einzelnen Horizonte unabhängig voneinander und nicht als gesamtes Horizontpaket modelliert. Dabei werden alle vorhandenen Daten interpoliert. Folglich kann die Darstellung der Höhenmodelle der Horizonte beziehungsweise der Mächtigkeitskarten der Einheiten durch dieses Vorgehen beeinflusst sein. Als Konsequenz daraus sind die Modelle mit einer Unsicherheit behaftet, die nicht quantifiziert werden kann (Kap. 7.2).

Bei der konzeptionellen Modellierung konnten einerseits diese artifiziellen Mächtigkeitsanomalien teilweise schon vermieden werden, indem die einzelnen Horizonte nicht unabhängig voneinander modelliert wurden (s. a. Kap. 5.3.5.3). Andererseits steckt ein geologisches Konzept hinter der Modellierung, so dass nicht alle Datenpunkte in die Interpolation miteinbezogen wurden. Ausserdem wurden bestehende artifizielle Mächtigkeitsanomalien nach der Horizontinterpolation durch Stützprofile ausgebessert.

### **Mächtigkeitskarte Sedimente der Kreide**

Im Allgemeinen nimmt die Sedimentmächtigkeit der Kreide von Südwesten nach Nordosten ab. Entlang der Linie

Biel-Thun keilen die Sedimente aus. Die grösste Mächtigkeit beträgt etwa 560 m. In der Modellregion Genf treten Mächtigkeitsschwankungen aufgrund der ausgeprägten Erosion der Sedimente der Kreide vor der Ablagerung der Molassesedimente auf. Die geringe Mächtigkeit von etwa 60 m nördlich von Genf könnte allerdings teilweise auf Probleme bei der Rasterinterpolation zurückzuführen sein und nicht nur auf lokale Erosion (CLERC 2016). In den Modellregionen Waadt und Freiburg ist die Sedimentmächtigkeit der Kreide ziemlich konstant. Eine Ausnahme bilden einzelne Modellsegmente zwischen den Blattverschiebungen, wo die Mächtigkeit in Richtung Jura zunimmt (MARCHANT & BAUER 2016).

### **Mächtigkeitskarte oberer Malm**

Die Mächtigkeit des oberen Malms nimmt generell von Westen nach Osten ab und von Norden nach Süden zu. Die grösste Mächtigkeit mit etwa 1250 m ist westlich von Lausanne anzutreffen.

Entlang einiger tektonischer Hauptstrukturen im Westschweizer Molassebecken wie der Störungszonen von Pontarlier-Vallorbe-Aubonne, Baulmes-Chablons oder Fribourg sind Mächtigkeitsschwankungen festzustellen. Dies könnte auf synsedimentäre Störungen oder die Reaktivierung von älteren Störungen hinweisen, wurde aber nicht abschliessend untersucht (GRUBER et al. 2013, MARCHANT & BAUER 2016).

### **Mächtigkeitskarte unterer Malm**

Generell nimmt die Mächtigkeit des unteren Malms von Westen nach Osten ab, jedoch mit einigen lokalen Mächtigkeitsschwankungen. Die Werte befinden sich zwischen 750 m und 10 m. Die Mächtigkeitsschwankungen deuten auf ein irreguläres Ausdünnen der Sedimentbeckenfazies hin (SOMMARUGA et al. 2012).

Im Teilmodell Genf sind die Mächtigkeitswerte des unteren Malms ziemlich konstant, mit Ausnahme rund um die Tiefbohrung Thônex-1, wo die Mächtigkeit abnimmt (CLERC 2016).

Im Teilmodell Waadt nimmt die Mächtigkeit von über 300 m in der Nähe des Juras bis weniger als 100 m im Südwesten ab. Die Progradation des unteren Malms in Richtung Südosten wird mit der Hebung aufgrund der Öffnung des Walliser Tros erklärt (STAMPFLI 1993). Daher steht die erwähnte Mächtigkeitsabnahme in Beziehung zu diesem geodynamischen Ereignis (MARCHANT & BAUER 2016).

Die Mächtigkeitszunahme des unteren Malms im Teilmodell Freiburg könnte mit der vergrösserten Subsidenz während des mittleren bis späten Oxfordiens (z.B. LOUP 1992, WETZEL et al. 2003) zusammenhängen. Der Ursprung der Mächtigkeitsschwankungen entlang der Fribourg-Zone ist nicht abschliessend geklärt. Das Vorhandensein von synsedimentären Störungen wird vermutet, braucht aber noch abschliessende Untersuchungen (GRUBER et al. 2013).

Im Teilmodell Bern zeigt der untere Malm im Südwesten des Modellgebiets maximale Mächtigkeit und dünnt in Richtung Nordosten aus. Die Mächtigkeitsabnahme auf etwa 65 m östlich von Hermsigen-1 ist fraglich. Wahrscheinlich ist sie auf Unstimmigkeiten zwischen geologischen Pro-

filen im untiefen Modellierbereich und den seismischen Rasterdaten im tiefen Modellierbereich zurückzuführen (MOCK 2016).

### **Mächtigkeitkarte Dogger**

Die Figur 6-19 zeigt die Mächtigkeitkarte des Doggers aus GeoMol17. Die Mächtigkeit nimmt im Allgemeinen von Nordwesten nach Südosten von über 600 m auf ungefähr 40 m ab. Das Mächtigkeitmaximum von etwa 600 m befindet sich in der Nähe der Tiefbohrungen Eclépens-1, Treyco-vagnes-1, Essertines-1 und Cuarny-1. Der Grund dafür sind an Überschiebungen gebundene Strukturen, welche zu einer Verdoppelung der Schicht führen (SOMMARUGA et al. 2012). Ein weiteres Maximum mit etwa 570 m ist bei der Tiefbohrung Courtion-1 anzutreffen. Mächtigungsminima befinden sich rund um die Tiefbohrungen Entlebuch-1 und Weggis sowie südlich von Tuggen.

### **Mächtigkeitkarte Lias**

Der Lias ist im Westschweizer Molassebecken deutlich mächtiger als im zentralen und östlichen Becken, wo er noch etwa 30–80 m mächtig ist. Die Mächtigkeitkarte des Lias von GeoMol17 unterscheidet sich leicht von der Mächtigkeitkarte des Lias des SASMB (SOMMARUGA et al. 2012, Enclosure 20). Im SASMB ist ein Mächtigkeitmaximum entlang des Juras im Nordwesten des Genfersees verzeichnet. In dieser Gegend können Überschiebungen und damit einhergehende tektonische Mächtigungszunahmen nicht ausgeschlossen werden (SOMMARUGA et al. 2012). In GeoMol17 befindet sich das Maximum mit etwa 900 m nördlich von Genf in der Nähe der Mont-Mourex-Struktur (CLERC 2016). Von dort aus nimmt die Mächtigkeit des Lias nach Südwesten und nach Südosten hin ab.

Mächtigkeitsschwankungen im Lias wurden den Tonsteinen des Toarciens und den Mergeln des Pliensbachiens zugeordnet (z.B. PAOLACCI 2012). Die Mächtigungsabnahme nach Südwesten wurde bereits von GORIN et al. (1993) aufgezeigt.

Die Mächtigkeitsschwankungen des Lias im Teilmodell Waadt von etwa 150 m im Norden und Südosten des Modells auf etwa 700 m in der Gegend von Aubonne–Morges reflektieren wahrscheinlich die Riftphase, die zur Öffnung der Tethys führte (STAMPFLI 1993). Die Baulmes-Chamblon-Störungzone könnte während der Ablagerung des Lias aktiv gewesen sein (MARCHANT & BAUER 2016).

Im Teilmodell Bern nimmt die Mächtigkeit des Lias von Westen nach Osten leicht ab. Nördlich von Bern befindet sich ein Mächtigkeitmaximum, welches künstlich zu sein scheint. Dies entstand am Ende einer seismischen Linie vermutlich aufgrund eines Interpolationsfehlers. Das Mächtigungsminimum nordöstlich der Tiefbohrung Hermrigen-1 ist sehr wahrscheinlich auf eine Unstimmigkeit in der Mächtigkeit zwischen dem untiefen und dem tiefen Modell zurückzuführen (MOCK 2016).

### **Mächtigkeitkarte Keuper**

Das Mächtigkeitmaximum des Keupers befindet sich zwischen dem Genfersee und dem Jura mit bis zu 1400 m im Störungskompartiment zwischen den Störungszonen von

St-Cergue–Luins, Pontarlier–Vallorbe–Aubonne und der Jurarücküberschiebung. Von dort aus nimmt die Mächtigkeit des Keupers nach Südwesten auf etwa 400 m und nach Südosten auf etwa 40 m ab.

Die Mächtigkeitkarte des Keupers von GeoMol17 unterscheidet sich westlich der E-Koordinatenlinie 2 550 000 von der Mächtigkeitkarte des «Late Triassic» des SASMB (SOMMARUGA et al. 2012, Enclosure 20). In GeoMol17 ist der Keuper viel mächtiger als im SASMB. Der Grund dafür ist die konzeptionelle Lage des basalen Abscherhorizonts. Im SASMB liegt der konzeptionelle basale Abscherhorizont an der Basis des mesozoischen Sedimentstapels (SOMMARUGA et al. 2012). Im Vergleich dazu liegt dieser in den Teilmodellen Genf und Waadt in den Evaporiten des Keupers (z.B. BURKHARD 1990). Aufgrund der Abscherung ist der Keuper stark tektonisiert und zeigt in den seismischen Daten chaotische Reflektoren, welche lokal auf interne Überschiebungen, Duplex- oder Triplexstrukturen hinweisen. Solche Strukturen erklären wichtige lokale Keupermächtigkeitmaxima, wie beispielsweise in der Nähe der Bohrung Treyco-vagnes-1, wo der Keuper dreimal wiederholt wird (SHELL 1978) oder im Südwesten des Teilmodells Waadt, wo die Mächtigkeit grösser als 1200 m ist. Richtung Osten dünnt der Keuper auf 300 m aus. Weiter im Nordosten dünnt der Keuper noch mehr aus (180 m bei der Tiefbohrung Courtion-1) während die Evaporite des Muschelkalks mächtiger werden. Dies spiegelt den Umstand wieder, dass in dieser Region der basale Abscherhorizont in den Muschelkalk wechselt (SOMMARUGA 1997, MARCHANT & BAUER 2016).

Der Ursprung der Mächtigkeitsschwankungen entlang der Fribourg-Zone ist nicht abschliessend geklärt. Das Vorhandensein von synsedimentären Störungen wird vermutet, braucht aber noch abschliessende Untersuchungen (GRUBER et al. 2013).

Im Teilmodell Bern zeigt der Keuper wellige Mächtigkeitsschwankungen ohne klaren Trend. In der Nähe der beiden Tiefbohrungen Thun-1 und Linden-1 gibt es eine Mächtigungszunahme, welche wahrscheinlich mit der Faltenbildung aufgrund des basalen Abscherhorizonts im Muschelkalk und der Salztektone im Keuper zu tun hat. Da der Keuper die Evaporitsequenz der Bänkerjoch-Formation enthält, ist er anfällig für Salztektone, und folglich können tektonisch bedingte Mächtigungsänderungen vorkommen (MOCK 2016).

### **Mächtigkeitkarte Buntsandstein und Muschelkalk**

Die Mächtigkeitkarte des Buntsandsteins und Muschelkalks zeigt allgemein ein sehr welliges Mächtigkeitbild. Die Maximalmächtigkeit befindet sich in der Region der Teilmodelle Freiburg und Bern mit Werten bis um 700 m. Nach Südwesten und nach Osten nimmt die Mächtigkeit ab. Mächtigungsminima sind bei Genf (etwa 80 m), beim Napf nördlich der Tiefbohrung Entlebuch-1 (etwa 60 m), bei der Tiefbohrung Küsnacht-1 (etwa 65 m) und östlich der Tiefbohrung Tuggen (etwa 40 m) zu erkennen.

Die Mächtigkeitkarte des Buntsandsteins und Muschelkalks von GeoMol17 unterscheidet sich westlich der E-Koordinatenlinie 2 550 000 von der Mächtigkeitkarte des «Early–Middle Triassic» des SASMB (SOMMARUGA et al.

# Mächtigkeitkarte

Dogger GeoMol17

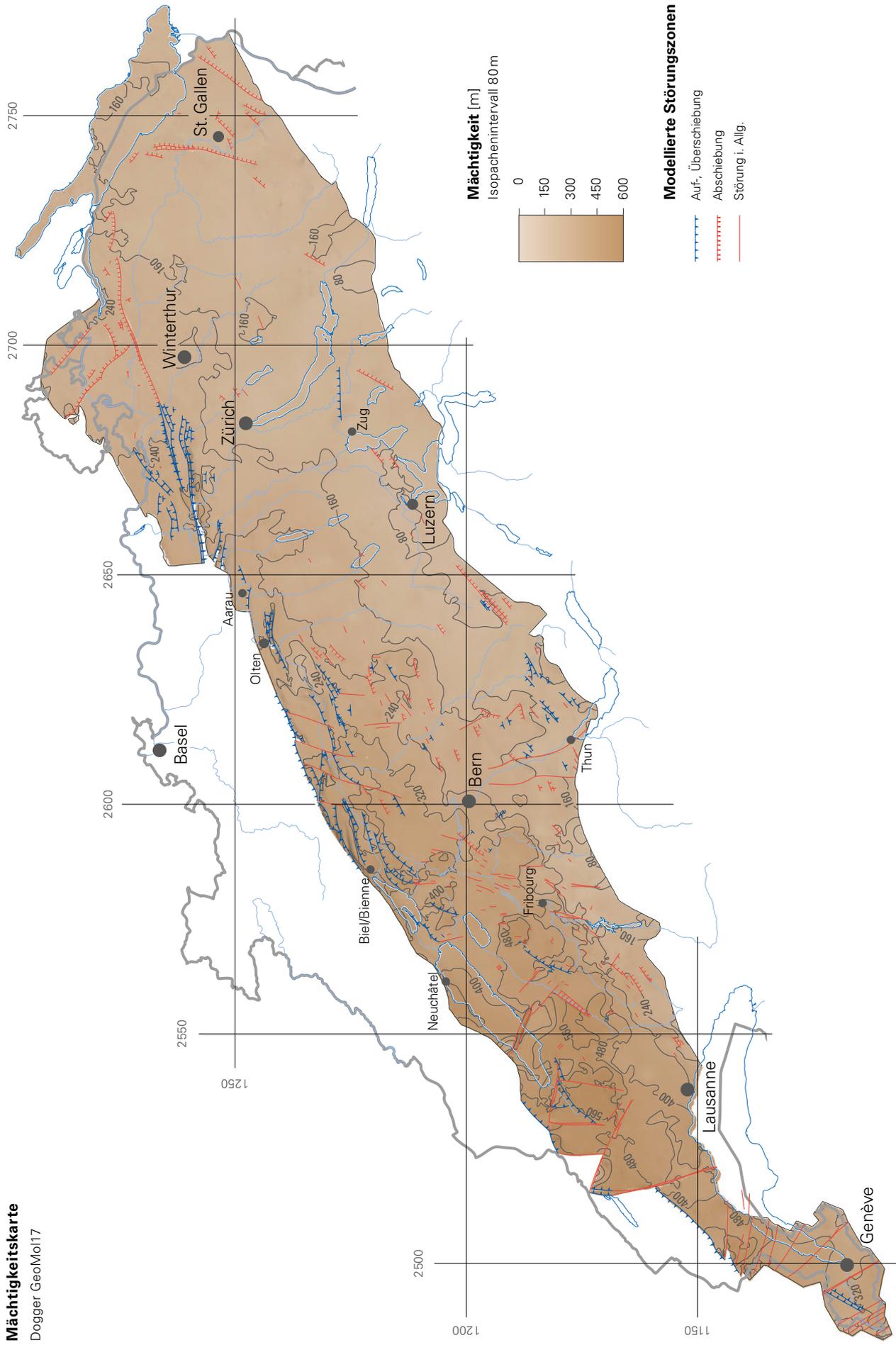


Fig. 6-19: Mächtigkeitkarte Dogger aus GeoMol17 (s. Beschreibung im Text).

2012, Enclosure 20). In GeoMol17 ist der Buntsandstein und Muschelkalk weniger mächtig als im SASMB. Grund dafür ist die konzeptionelle Positionierung des basalen Abscherhorizonts (analog zum Keuper). Im Vergleich zu GeoMol17 liegt im SASMB der konzeptionelle basale Abscherhorizont an der Basis des mesozoischen Sedimentstapels (SOMMARRUGA et al. 2012). In den Teilmodellen Genf und Waadt befindet sich dieser in den Evaporiten des Keupers. Deshalb ist die Mächtigkeit des Buntsandsteins und Muschelkalks dort ziemlich konstant. Lokal kann die Mächtigkeit aufgrund der Auffüllung eines Paläoreliefs (erosiver Basis-«Mesozoikum»-Horizont) variieren (MARCHANT & BAUER 2016). Die Mächtigkeitswerte befinden sich zwischen 80 m und 300 m. Andererseits können diese Mächtigkeitschwankungen aber auch durch die teilweise schwierige Interpretierbarkeit der beiden Horizonte Top Muschelkalk und Basis «Mesozoikum» auf der Seismik (s. a. Kap. 5.3.2) bedingt sein, weshalb sie mit Unsicherheit behaftet sind (CLERC 2016).

In den Teilmodellen weiter östlich liegt der basale Abscherhorizont in den Evaporiten des Muschelkalks (Zeglingen-Formation). Daher ist sie sehr sensitiv für Mächtigkeitschwankungen (z.B. Salzkissen, Regionen von Salzkumulation und Salzverminderung, MOCK 2016). So kann die mit der Abscherung einhergehende Deformation teilweise die Mächtigkeitszunahme des Muschelkalks in den Teilmodellen Freiburg und Bern erklären. Die Mächtigkeitschwankungen entlang der Fribourg-Zone könnten auch auf synsedimentäre Störungen hindeuten, dies ist aber nicht abschliessend geklärt (GRUBER et al. 2013). Auch hier könnten künstliche Mächtigkeitschwankungen vorkommen, da der Basis-«Mesozoikum»-Horizont anfällig auf Fehlinterpretation ist (MOCK 2016).

Entlang des Juras ist in den Teilmodellen Freiburg und Bern eine Mächtigkeitszunahme erkennbar. Diese ist auf den basalen Abscherhorizont im Muschelkalk zurückzuführen, da dieser hier den Basis-«Mesozoikum»-Horizont nicht beeinflusst. Zwischen den Tiefbohrungen Hermrigen-1 und Weiach-1 sind einige längliche, SW-NE-orientierte Mächtigkeitszunahmen beziehungsweise -abnahmen zu erkennen. Diese zeigen die Antiklinal- und Synklinalstrukturen im Molassebecken. Die Mächtigkeitszunahmen bilden die Kerne der Antiklinalen, welche meist mit Überschiebungen einhergehen, die im basalen Abscherhorizont ihren Ursprung haben.

### 6.2.3 Grenzabgleich der Teilmodelle

Vor Beginn der Modellierung wurde zwischen den einzelnen Teilmodellen je eine Grenzlinie definiert, entlang derer die Teilmodelle in einem letzten Arbeitsschritt zusammengesetzt werden konnten. Viele dieser Grenzlinien sind identisch mit einer seismischen Sektion, einige kreuzen Tiefbohrungen, liegen in der Nähe davon oder sind teilweise durch eine Störungszone definiert.

Entlang dieser Grenzlinien wurden zusätzlich Grenzregionen definiert, innerhalb derer sich die Teilmodelle überlappen. Innerhalb dieser Regionen wurden Störungs- und Horizontflächen aufeinander abgeglichen (Kap. 5.3.7).

Je nach angewendetem geologischen Konzept, gewähltem Vorgehen bei der Modellierung und der geologischen

Kenntnisse des Modellierers können geologische 3D-Modelle anders ausgestaltet sein, obwohl dieselben Grundlagedaten verwendet wurden. Dieses Problem trat auch bei GeoMol17 auf, indem zwischen den Horizonten der Teilmodelle vor dem Grenzabgleich teilweise Höhenunterschiede im Bereich von mehreren hundert Metern bestanden. Die Gründe dafür sind vielfältig und werden nachfolgend kurz beschrieben.

Einerseits spielen die Qualität, die Dichte und gegenseitige Korrelierbarkeit der verwendeten Grundlagedaten (Seismik, Bohrungen, Karten usw.) eine wichtige Rolle (s. a. Kap. 7.1). Ob die Eingangsdaten nur innerhalb oder auch ausserhalb der Modellregion liegen, beeinflusst die Modellierung ebenfalls.

Unterschiedliche Interpretationen von Horizonten und Störungen auf einer seismischen Sektion führen konsequenterweise zu unterschiedlichen Modellen (s. a. Kap. 7.2.2). Weiter können Höhenunterschiede aufgrund der verwendeten geologischen Karten entstehen. Wenn in zwei angrenzenden Teilmodellen verschiedene, nicht harmonisierte geologische Karten verwendet wurden, sind die Ausbisslinien nicht abgeglichen. Infolgedessen ist die Anbindung der Horizonte an der Oberfläche anders modelliert worden.

Das Vorhandensein von Tiefbohrungen innerhalb oder in der Nähe der Grenzregionen beeinflusst das Höhenmodell der Horizonte. Dies ist in dem Sinne entscheidend, als dass die Grenzlinien zwischen den Teilmodellen wenn möglich durch seismische Sektionen gebildet und deren Interpretationen durch die Tiefbohrungen korreliert wurden. Dies wirkt sich wiederum auf die Lage der interpretierten Horizonte auf den seismischen Sektionen aus.

Die Wahl der verwendeten Softwarepakete, verwendete Interpolationsmethoden und deren Eingabeparameter oder die gewählte Maschenweite bei der Rasterung von Horizonten beeinflussen das Resultat der Modellierung ebenfalls.

Das für die Tiefenumwandlung der seismischen Interpretationen verwendete Geschwindigkeitsmodell ist eine wichtige Grundlage für einen erfolgreichen Grenzabgleich. Das Vorgehen bei der anschliessenden Anpassung der Horizonte an die Bohrmarker der Tiefbohrungen (Bohrungskalibrierung) ist ebenfalls massgebend für den Höhenverlauf der Horizonte. Ausschlaggebend ist hier die Anzahl der verwendeten Bohrungen und ob diese nur innerhalb oder auch ausserhalb der Modellregion liegen.

Das geologische Konzept spielt bei der Störungsmodellierung eine wichtige Rolle und kann zu markanten Unterschieden in den Modellen führen. Es beeinflusst einerseits die Interpretation der vorhandenen Grundlagedaten. Andererseits hat es auch weitere Auswirkungen auf die Modellierung, die Modelle und den Grenzabgleich. Beispiele:

- Eine Störungszone oder auch eine Faltenstruktur wurde nur in einem von zwei angrenzenden Teilmodellen modelliert.
- Eine Störung wurde in beiden Teilmodellen modelliert, aber nicht bis in dieselben Tiefenbereiche.
- In beiden Teilmodellen wurde nicht mit demselben Detaillierungsgrad gearbeitet (unterschiedliche Anzahl Störungsflächen für eine Störungszone).

**GeoMol 17**

Grenzabgleich der Teilmodelle

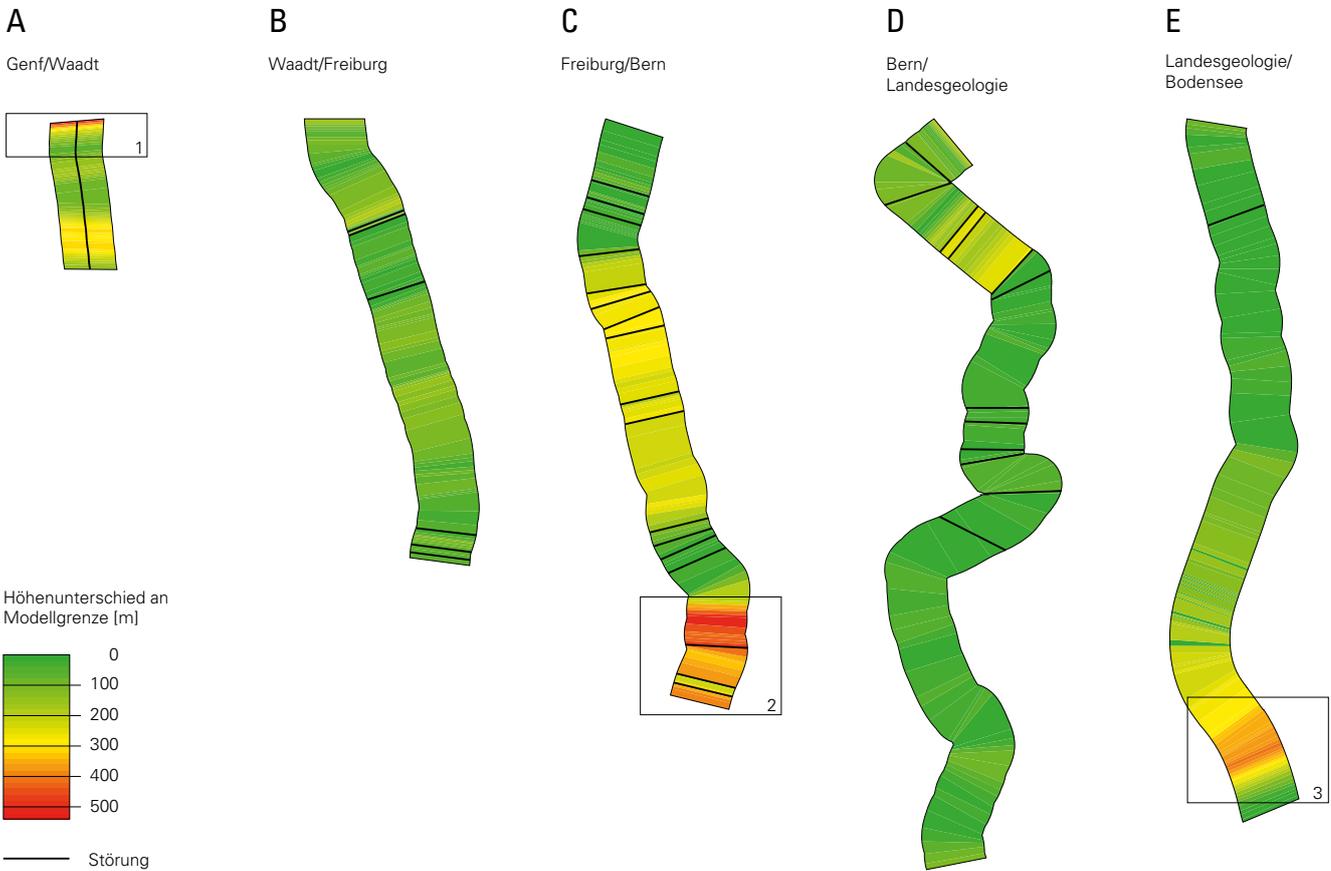
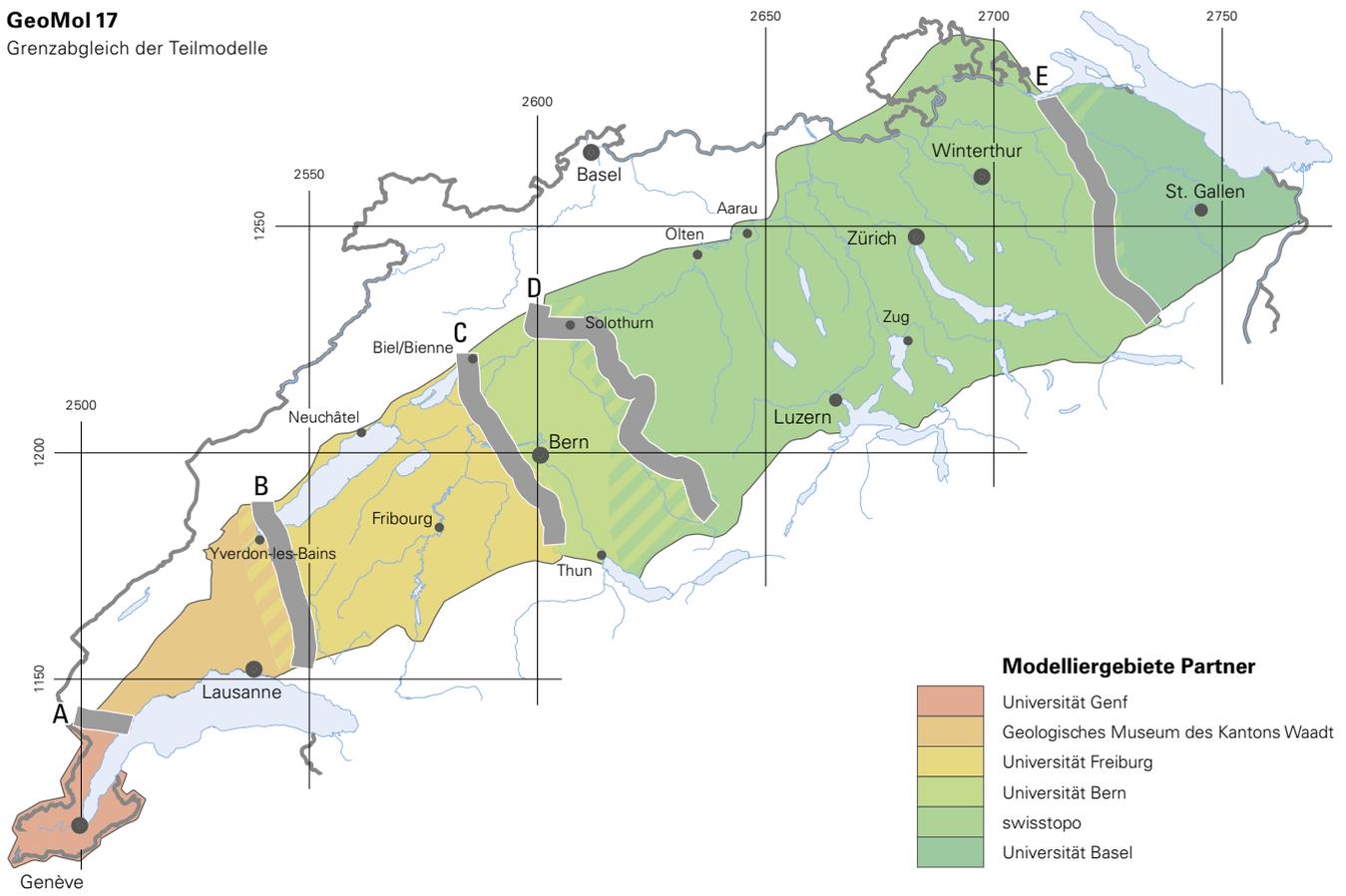


Fig. 6-20: Grenzabgleich der Teilmodelle. Darstellung der Grenzregionen mit dem Höhenunterschied des Höhenmodells Top Dogger zwischen zwei angrenzenden Teilmodellen entlang der Grenzlinie (s. Beschreibung im Text).

- In einem der beiden Teilmodelle wurden die Horizonte mit Störungsstufen modelliert, im anderen Teilmodell wurden die Horizonte an den Störungen ausgeschnitten (s. a. Kap. 5.3.6.1).

In der Figur 6-20 sind die Grenzregionen zwischen den Teilmodellen dargestellt. In diesen Regionen wurden die Störungsflächen und Horizonte aus benachbarten Teilmodellen aufeinander abgeglichen (Kap. 5.3.7). Entlang der Grenzlinien (A-E in Fig. 6-20) sind die Höhenunterschiede der Höhenmodelle des Top-Dogger-Horizonts zwischen den Teilmodellen vor dem Grenzabgleich eingefärbt. Meist sind sie an Störungen gebunden. Es fallen drei Regionen mit sehr grossen Höhenunterschieden auf (Fig. 6-20, Nr. 1-3). Diese werden nachfolgend erklärt.

Zwischen den Teilmodellen Genf und Waadt gibt es gegen den Jura hin grössere Höhenunterschiede (Fig. 6-20, Nr. 1). Dies ist vor allem auf die unterschiedliche Modellierung der Horizonte und Störungen sowie auf die Begrenzung des Modellgebiets zurückzuführen. Die Begrenzung des Modellgebiets ist auf die Ausdehnung des Molassebeckens definiert. Da diese unterschiedlich interpretiert werden kann, wurde im Teilgebiet Waadt die Jurarücküberschiebung mitmodelliert, im Teilmodell Genf nicht.

Die Höhenunterschiede im Süden zwischen den Teilmodellen Freiburg und Bern (Fig. 6-20, Nr. 2) sind einerseits auf unterschiedliche Interpretationen der seismischen Sektionen zurückzuführen. Durch unterschiedliche tektonische Konzepte können die Interpretationen von Störungen und dadurch auch die Versätze von Horizonten unterschiedlich ausfallen (s. a. Kap. 6.2.1). Andererseits gibt es in diesem Gebiet keine seismischen Sektionen, welche die Grenzsektion kreuzen und in beide Teilmodelle hineinreichen (Fig. 4-1 u. Fig. 4-2). Zusammen mit fehlenden Fixpunkten, wie Tiefbohrungen, bleiben solche Abweichungen in den Interpretationen über weite Strecken unerkannt.

Die Höhenunterschiede im südlichen Übergangsbereich zwischen den Teilmodellen Landesgeologie und Bodensee (Fig. 6-20, Nr. 3) sind auf unterschiedliche Geschwindigkeitsmodelle und die anschliessende Bohrungskalibration zurückzuführen. Im Teilmodell Bodensee wurden die Horizonte mit einem ersten Geschwindigkeitsmodell in Tiefe umgewandelt, während die Tiefenumwandlung im Teilmodell Landesgeologie mit einer neueren Version durchgeführt wurde. Ausserdem wurden für die Bohrungskalibration im

Teilmodell Bodensee nur Bohrungen innerhalb der Modellregion verwendet, während im Teilmodell Landesgeologie auch solche ausserhalb der Modellregion verwendet wurden.

#### 6.2.4 Geschwindigkeitsmodell

Die für GeoMol17 erarbeiteten Intervallgeschwindigkeiten stellen das aktuellste Geschwindigkeitsmodell der wichtigsten Markerhorizonte des Schweizer Molassebeckens dar. Ein solches Modell ist allerdings nie abgeschlossen. Mit jedem zusätzlich verfügbaren Check-shot kann das Modell ergänzt und somit der Wissenstand über die Geologie im tiefen Untergrund verbessert werden. Unterschiede zum Geschwindigkeitsmodell von SOMMARUGA et al. (2012) sind im Kapitel 5.3.4 beschrieben.

Generell liegen die Isochronen der Geschwindigkeitskarten aller modellierten Horizonte (Anh. 4.1-4.12) etwa parallel zur Achse des Schweizer Molassebeckens. Sie zeigen tiefe Geschwindigkeiten entlang des Jurasüdfusses und zunehmende Geschwindigkeiten gegen die Alpen im Südwesten. Diese Geschwindigkeitszunahme ist auf die zunehmende Tiefe des Sedimentstapels im Molassebecken von Nordwesten nach Südosten und damit verbunden seiner stärkeren Kompaktion zurückzuführen. Auch die Verteilung der Bohrungen mit Geschwindigkeitsdaten im Molassebecken hat einen Einfluss auf das Erscheinungsbild der Geschwindigkeitskarten. Auffallend ist hierbei die Gegend am südwestlichen Ufer des Neuenburgersees, wo sich mehrere Tiefbohrungen mit für verlässlich gehaltenen Geschwindigkeitswerten befinden (Anh. 4.7, 4.8 u. 4.11). In dieser Gegend finden sich auch mehrere tektonische Strukturen, welche die Ableitung von repräsentativen Intervallgeschwindigkeiten beeinflussen können. So ist es beispielsweise denkbar, dass die Bohrung Treycovagnes-1 höhere Geschwindigkeitswerte aufweist als erwartet, da die erbohrte Struktur infolge der Jurafaltung emporgehoben wurde (MARCHANT & BAUER 2016). So können ursprünglich tiefergelegene und entsprechend kompaktere Gesteine den Verlauf der Isochronen beeinflussen. Ein ähnlicher Effekt könnte für die gut sichtbare Anomalie in der Intervallgeschwindigkeitskarte des Doggers (Anh. 4.9) in der Umgebung der Bohrung Hermrigen-1 verantwortlich sein. Im Umfeld des Bodensees sind einige Anomalien auf deutschem Hoheitsgebiet erkennbar, welche nicht weiter untersucht wurden.

## 7. Qualitätssicherung und Unsicherheit

Die Erstellung eines geologischen 3D-Modells ist unter anderem von der Art, der Menge und dem Alter der verfügbaren Grundlagedaten sowie der Erfahrung und den Vorkenntnissen der Modellierer abhängig. Vor allem erstere können in der Regel während des Erstellungsprozesses nicht mehr oder nur sehr eingeschränkt beeinflusst werden, da beispielsweise die Datenaufnahme bereits abgeschlossen ist oder die Originaldaten nicht mehr verfügbar sind. Der Produktionsprozess muss aus diesen Gründen jeweils flexibel an die bestehenden Gegebenheiten angepasst werden, ohne dabei die Ziele der Qualitätssicherung (s. a. Kap. 7.1) zu vernachlässigen (LANDESGEOLOGIE 2011). Qualität ist ein fließender Begriff und bezieht sich hier nicht ausschliesslich auf die anzustrebende Fehlerfreiheit eines geologischen 3D-Modells. Die Konsistenz, die Vollständigkeit und der Detaillierungsgrad eines 3D-Modells sowie die Art und Weise der Visualisierung sind ebenfalls zur Qualität hinzuzählen. Zudem ist der Qualitätsbegriff im gegebenen Zusammenhang auch massstabsabhängig.

Geologische 3D-Modelle dienen immer häufiger als Grundlage für Entscheidungsprozesse in Wirtschaft, Verwaltung und Forschung, daher sind Informationen über die mit dieser Darstellungsform verbundenen Unsicherheiten äusserst wichtig (LARK et al. 2013). Geologische 3D-Modelle beruhen immer auf Interpretationen und sind selbst eine Interpretation des Untergrunds. Deswegen existiert in der geologischen 3D-Modellierung kein eindeutiges «richtig» oder «falsch». Die Modelle stellen nur eine Annäherung an die Realität dar und erheben konsequenterweise nie den Anspruch, exakt der Realität zu entsprechen. So gesehen ist jedes geologische 3D-Modell immer mit einer Unsicherheit behaftet. Die verwendeten Grundlagedaten, die Vorgehensweise und die Expertise der Bearbeiter stellen die wichtigsten Faktoren dar, welche die Unsicherheit beeinflussen. Die Identifikation, Beschreibung und Quantifizierung dieser Faktoren muss zwingend vor, während und nach der Modellierung geschehen und transparent dokumentiert werden. Damit können den Nutzern Anhaltspunkte über die Verlässlichkeit und Einsatzmöglichkeiten der Modelle vermittelt werden (WELLMANN et al. 2014).

Im Projekt GeoMol lag der Fokus auf einer geologischen 3D-Modellierung basierend auf Daten Dritter. Dieses Kapitel beschreibt die Herangehensweise und gefundenen Lösungen zur Qualitätssicherung (Kap. 7.1) und zum Umgang mit den Unsicherheiten (Kap. 7.2) innerhalb von GeoMol Schweiz.

### 7.1 Qualitätssicherung

In Anlehnung an die Qualitätsdefinition nach EN ISO 9000 sollen geologische 3D-Modelle geologisch, geometrisch und kinematisch korrekt sowie vollständig sein. Letzteres ist immer von der Fragestellung und vom Massstab abhängig. Auf dieser Basis können sie dem geplanten Verwendungszweck bei den Anwendern dienen.

Diesem theoretischen Anspruch stehen grundsätzliche, praktische Erschwernisse gegenüber:

- Mehr als 95 % der in GeoMol 15 und GeoMol 17 verwendeten Datensätze wurden von Dritten zur Verfügung gestellt. Häufig bestand keine Zugriffsmöglichkeit auf die Originaldaten.
- Die Datenbasis der beiden Modelle ist bezüglich der Herkunft und des ursprünglichen Verwendungszwecks sehr heterogen. Sie besteht aus Interpretationen und Auswertungen von verschiedenen Daten (Seismik, Bohrungen, geologischen Karten und Profilen usw.) aus unterschiedlichen Jahren mit ungleichem Qualitäts- und Detaillierungsgrad.
- Die aus verschiedenen Quellen zur Verfügung gestellten Daten lagen bezüglich Erhebung, Prozessierung, Interpretation und Nutzung vor der Datenübernahme nicht aufeinander abgestimmt vor. Sie mussten daher für die praktische Anwendung aufeinander abgestimmt und gegebenenfalls vereinfacht werden.
- Die Modelle GeoMol 15 und GeoMol 17 setzen sich aus Teilmodellen zusammen. Die Teams, die diese Teilmodelle erstellt haben, wandten zum Teil unterschiedliche technische Herangehensweise an.
- Die eigentlichen Modellierungsarbeiten (Aufbereitung, Interpretation, Interpolation und/oder Extrapolation von Daten) wurden von einer Vielzahl verschiedener Bearbeiter durchgeführt, deren technische Herangehensweise, individuelles geologisches Hintergrundwissen und spezifische Erfahrung unterschiedlich war.

In der Praxis ist die Qualität eines geologischen 3D-Modells sehr vielschichtig und kann nicht in allen Aspekten eindeutig definiert und mit Fakten unterlegt werden. Das eigentliche Ziel der Qualitätssicherung ist das Schaffen von Vertrauen in das Produkt «Geologisches 3D-Modell». Damit dies gelingt, muss sich die Qualitätssicherung solcher Modelle auf klar definierte, transparente Faktoren abstützen. Aus diesem Grund wurden bereits im Vorfeld von GeoMol vier Komponenten für die Qualitätssicherung definiert, welche die Qualität der geologischen 3D-Modelle von swisstopo sicherstellen (Tab. 7-1).

Tab. 7-1: Die vier Aspekte der Qualitätssicherung für geologische 3D-Modellierung (nach LANDESGEOLOGIE 2011) mit Beschreibung der jeweiligen Grundsätze.

Aspekt	Grundsätze	Beispiel
Qualität der Durchführung und Grundsätze der Modellierung	Die Qualität der Durchführung wird gewährleistet, indem Grundsätze und standardisierte Arbeitsabläufe für die geologische 3D-Modellierung erarbeitet werden. Die Grundsätze der Durchführung sind offen und transparent formuliert sowie zentral abgelegt und zugänglich.	Kap. 7.1.1
Qualität der Grundlagedaten	Die Qualität der Grundlagedaten wird für jeden Datentyp separat geprüft. Dafür werden entsprechende Grundlagen und Checklisten erarbeitet. Wo möglich und sinnvoll, werden die Grundlagedaten entsprechend qualifiziert. Daten von schlechter Qualität werden, im Falle einer Verwendung, entsprechend gekennzeichnet und wenn möglich verbessert.	Kap. 7.1.2
Qualität der eingesetzten Ressourcen (Hilfsmittel und Personal)	Die eingesetzten Hilfsmittel (Hardware und Software) werden laufend auf Ihre Aktualität und Leistungsfähigkeit hin überprüft und gegebenenfalls aktualisiert oder ersetzt. Zusätzlich verfügen die Mitarbeitenden über eine erdwissenschaftliche Ausbildung, fachliche Kenntnisse in der 3D-Modellierung sowie Kenntnisse der eingesetzten Hilfsmittel. Der interne Erfahrungsaustausch ist ein zentrales Element der Qualitätssicherung.	–
Überprüfung der Qualitätssicherung	Die interne Qualitätssicherung wird in regelmässigen Abständen einem Review unterzogen und, falls notwendig, den neuen Anforderungen angepasst.	Kap. 7.1.5

Folgende Beispiele zeigen, in welchen Bereichen Qualitätssicherungs-Massnahmen angewendet wurden.

### 7.1.1 Qualität der Durchführung

Ein wesentlicher Teil der Arbeit bestand darin, fehlende Vorgehensweisen und Methoden zu erarbeiten und weiterzuentwickeln. Die Landesgeologie hat jede neu entwickelte oder adaptierte Vorgehensweise oder Methodik schriftlich dokumentiert. Zusätzlich haben die Partner (s. a. Fig. 1-2) die geleisteten Arbeiten zwecks Nachvollziehbarkeit in einem Journal dokumentiert. Damit konnte die Modellierung transparent und nachvollziehbar gestaltet und ein zentraler Beitrag zur Qualitätssicherung geleistet werden.

### 7.1.2 Qualität der Grundlagedaten

Im Projekt GeoMol war keine neue Datenaufnahme vorgesehen. Daher konnten schon zu Projektbeginn Leitlinien für die Qualitätsüberprüfung der Daten und Hinweise zu deren Weiterverwendung definiert werden. Bereits vorhandene Daten wurden, falls möglich und sinnvoll, mit geringem Aufwand verbessert. Hauptsächlich aufgrund der unterschiedlichen Datendichte erwies es sich als wichtig, vor allem isolierte Datenpunkte zu überarbeiten. Korrekturen der Eingangsdaten wurden als solche gekennzeichnet und dokumentiert.

#### 7.1.2.1 Generelle Vorgehensweise

Zur Erstellung der beiden 3D-Modelle GeoMol15 und GeoMol17 wurden Informationen aus einer Vielzahl von Grundlagedaten verwendet (z.B. seismische Daten, geologische Karten und Profile, Bohrdaten). Diese ergänzten sich

in den meisten Fällen inhaltlich, waren aber auch durch spezifische Qualitätsunterschiede charakterisiert. Generell ist festzuhalten, dass die Qualität der verwendeten Grundlagedaten sehr variiert und die Datensätze noch vor ihrer weiteren Verwendung beurteilt werden müssen. Für die Qualitätssicherung der erwähnten Grundlagedaten wurde ein detaillierter Workflow erarbeitet (Fig. 7 1).

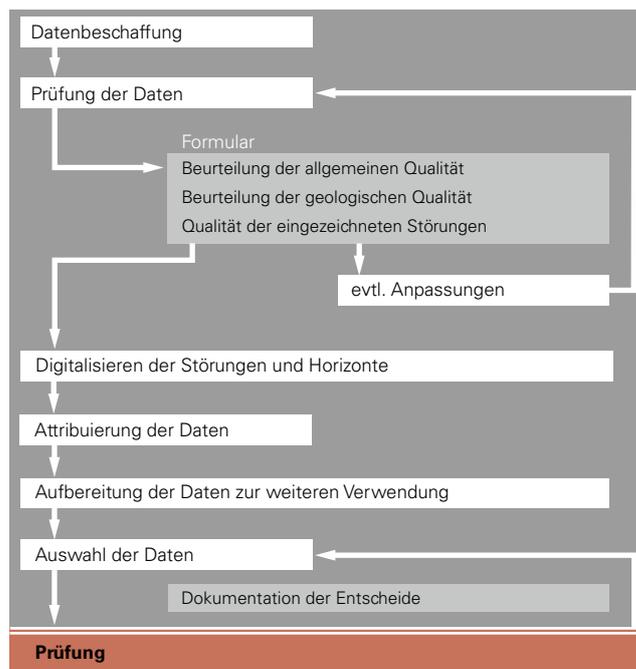


Fig. 7-1: Workflow «Qualitätssicherung Datenübernahme» für die Erstellung von geologischen 3D-Modellen.

### 7.1.2.2 Bohrdaten

Bohrdaten stellen die zuverlässigste Quelle für Informationen im Untergrund dar. Punktuell erlauben sie einen sehr präzisen Einblick in den Untergrund, der mit der maximal möglichen Zuverlässigkeit gesichert sein muss (Koordinaten, Ansatzhöhe, Neigung, Orientierung und Zweck). Weiter tragen Angaben wie das Alter und die Bohrrart zur Qualitätseinordnung von Bohrdaten bei. Für die Integration von Bohrdaten in die GeoMol-Bohrdatenbank wurde ein Leitfaden entwickelt (LANDESGEOLOGIE 2014a), der notwendige Qualitätsmerkmale, die Bestimmung der vertikalen Ungenauigkeit des Bohrprofils und ergänzende Methoden der Qualitätssicherung definiert. Damit konnte eine einheitliche Qualitätsbeschreibung der für die Modellerstellung verwendeten Bohrdaten sichergestellt werden.

### 7.1.2.3 Seismische Daten

Für GeoMol15 und Teile von GeoMol17 wurde keine Klassifikation zur Qualität seismischer Sektionen vorgenommen. In anderen Arbeiten (z.B. SOMMARUGA et al. 2012) wurde die Kontinuität der Reflektoren beurteilt, um die visuelle Darstellung seismischer Sektionen zu bewerten. Weil Reflektordiskontinuitäten auch auf Probleme bei der seismischen Akquisition oder auf unzureichende seismische Datenverarbeitung zurückgeführt werden können, wurde diese Beurteilung hier nicht durchgeführt. So können zum Beispiel ungenügende Korrekturgeschwindigkeiten für die quartären Lockergesteine Artefakte im tieferen Untergrund verursachen, welche in weiterer Folge zu Reflektordiskontinuitäten führen. Nicht zuletzt können solche Diskontinuitäten aber auch auf ein geologisches Phänomen im Untergrund zurückzuführen sein. Eine Beurteilung seismischer Daten anhand der Kontinuität von Reflektoren erlaubt so gesehen lediglich Aussagen über ihre Interpretierbarkeit, greift für eine stichhaltige Qualitätseinstufung aber zu kurz.

Weitere wichtige Einflüsse auf die Interpretation seismischer Sektionen sind:

- Die Nähe zu einer Bohrung mit verlässlichen Check-shot-Daten. Liegt eine seismische Kampagne fernab einer Bohrung, sind wegen fehlender Korrelationsmöglichkeiten weitere Ungenauigkeiten zu erwarten.
- Korrelierbarkeit mit Sektionen aus anderen Kampagnen. An Kreuzungen seismischer Sektionen aus unterschiedlichen Kampagnen und mit unterschiedlichen Prozessierungen kommt es meistens zu Misties der Reflektoren.

### 7.1.2.4 Geologische Profile

Die geologischen Profile (der Transekte) aus SOMMARUGA et al. (2012) wurden für die Verwendung in GeoMol15 bilanziert und somit wurde eine Qualitätsabschätzung erreicht (LANDESGEOLOGIE 2014b). Basierend darauf konnten pro Profil eventuell vorhandene Unstimmigkeiten beschrieben werden, welche als Grundlage für die spätere Erstellung von GeoMol15 dienen. Zudem wurde bei räumlichen Betrachtung der zweidimensionalen seismischen Interpretation Unstimmigkeiten erkannt und für die 3D-Modellierung angepasst.

Für GeoMol17 wurden bestehende geologische Profile unterschiedlichen Alters und verschiedener Herkunft bearbeitet (Kap. 4.3). In der Qualitätssicherung wurde keine explizite Qualifizierung vorgenommen, sondern aufgrund der beschriebenen Bearbeitung eine Empfehlung für die weitere Nutzung (möglich, mit Vorbehalt) für GeoMol17 abgegeben.

### 7.1.3 Qualitätssicherung der Teilmodelle

Die Arbeiten an GeoMol17 wurden von der Landesgeologie in Zusammenarbeit mit mehreren Partnern durchgeführt. Die eingereichten Arbeitsresultate (3D-Modelle und Arbeitsjournale, s. a. Kap. 7.1.1) wurden nach einem standardisierten Verfahren geprüft. So wurde jedes Teilmodell in regelmässigen Abständen mit Profilen geschnitten und dazu Mächtigkeitkarten der stratigraphischen Einheiten erstellt. Damit war es möglich, die inhaltliche und geologische Nachvollziehbarkeit sowie die Vollständigkeit beurteilen zu können. Weitere Prüfkriterien waren:

- Die angewandte Methodik bei der Modellierung von Störungszonen (topologisch korrektes, «wasserdichtes» Störungsmodell, Modellierung von Versätzen) und Horizonten («wasserdichte» Verbindungen zu Störungen, Verbindung der Untergrund- mit Oberflächendaten),
- Die Übereinstimmung zwischen den stratigraphischen Kontakten an den Bohrungen und den modellierten Horizonten sowie
- die topologische Konsistenz der Störungs- und Horizontflächen.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen wurden dokumentiert, mit den Partnern besprochen und die Teilmodelle, wo nötig und sinnvoll, verbessert.

### 7.1.4 Felsoberfläche

Für die Modellierung der Felsoberfläche im Schweizer Mittelland und den grossen Alpentälern wurde die Qualität der verwendeten Grundlagedaten (geologische und topographische Karten, digitale Höhenmodelle) nicht beurteilt. Sie wurden so verwendet, wie sie vorlagen (LANDESGEOLOGIE 2015). Die direkt genutzten Eingangsdaten (Bohrungen, bestehende Felsmodelle) wurden ebenfalls nicht neu bewertet, sondern für die Qualitätsbeurteilung auf die vorhandenen Leitfäden (LANDESGEOLOGIE 2013) beziehungsweise Publikationen verwiesen (s. a. Kap. 7.1.2). Eine Qualitätskontrolle der Bohrdaten erfolgte erst während der Modellierung (s. a. Kap. 5.3.5.1).

### 7.1.5 Überprüfung der Qualitätssicherung

Ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung für GeoMol Schweiz lag darin, einzelne Teilresultate extern überprüfen zu lassen. Zudem wurde das ganze Projekt (Projektmanagement, fachliche Arbeit, Projektmarketing) regelmässig einem externen Review unterzogen. Drei Beispiele verdeutlichen dies:

- Geschwindigkeitsmodell: Das für GeoMol17 komplett neu erstellte Geschwindigkeitsmodell (Kap.5.3.4 und Kap.6.2.4) wurde im Jahr 2015 vor der Verwendung für die Modellierung von externen Experten geprüft.
- Review Projekt: Die Projektarbeit im Rahmen von GeoMol Schweiz wurde während der Projektdauer zweimal jährlich einer internationalen Expertengruppe präsentiert. Jede Sitzung wurde dokumentiert und die von der Expertengruppe gegebenen Empfehlungen aufgenommen und bearbeitet. Dadurch konnten wertvolle Hinweise auf die inhaltliche und organisatorische Arbeit gewonnen werden.
- Begleitgruppe: Die Projektpartner waren gemäss gegenseitiger Vereinbarung Mitglieder der Begleitgruppe, welche ebenfalls zweimal jährlich zu einer Besprechung eingeladen waren. Anlässlich dieser Gelegenheiten wurde der aktuelle Projektstand durch alle involvierten Partner präsentiert. Der gegenseitige Austausch und damit die Information zum Projektverlauf standen bei diesen Sitzungen jeweils im Vordergrund.

## 7.2 Unsicherheit geologischer 3D-Modelle

Geologische 3D-Modelle wie GeoMol15 und GeoMol17 werden aufgrund von geologischem Expertenwissen erstellt. Dabei werden eine Vielzahl von Grundlagedaten mit dem vorhandenen Wissen über die regionale Geologie und den Erfahrungen der bearbeitenden Geologen kombiniert. Der Qualität der Eingangsdaten kommt dabei eine zentrale Rolle zu, da sie die Verlässlichkeit der darauf aufbauenden geologischen Interpretation beeinflusst. Im Gegensatz zu automatischen Produktionsverfahren können somit in der manuell geprägten geologischen 3D-Modellierung keine mathematisch gesicherten Qualitätsindizes berechnet werden. Der Einfluss des Faktors «Mensch» kann während dem Erstellungsprozess dazu führen, dass beispielsweise gleiche Grundlagen anders bewertet oder mit gleichen Daten unterschiedliche Interpretationen vorgenommen werden. Die Beschreibung dieser Unsicherheit eines geologischen 3D-Modells ist wichtig, da sie dem zukünftigen Nutzer Angaben über die Anwendungsmöglichkeiten und Verlässlichkeit des geologischen Modells macht (GUNNINK et al. 2010).

Die Beschreibung und Quantifizierung der Verlässlichkeit eines Modells sind zentrale Themen in der geologischen 3D-Modellierung (z.B. DAVIS & KELLER 1997, PANG et al. 1997, TACHER et al. 2006, WYCISK et al. 2009, WELLMANN et al. 2010, WELLMANN et al. 2011). Ebenso nimmt die Abschätzung der Unsicherheit von geologischen 3D-Modellen (z.B. TACHER et al. 2006, ZHU & ZHUANG 2010, WELLMANN et al. 2011) und die Beschreibung vorhandener methodischer Ansätze (z.B. TACHER et al. 2006, KAUFMANN et al. 2008, BISTACCHI et al. 2009, BISTACCHI 2010) einen hohen Stellenwert ein. Im Gegensatz dazu wird der Beschreibung der Unsicherheit der Grundlagedaten bis heute nur wenig Beachtung geschenkt. Es sind jedoch genau diese Daten, welche einen wesentlichen Beitrag zur Unsicherheit eines geologischen 3D-Modells beitragen und deswegen einer erhöhten Aufmerksamkeit bedürfen.

In GeoMol wurde die Unsicherheit nicht für alle Grundlagedaten bewertet. Für die Resultate konnte weder eine geeignete Methode angewendet noch erarbeitet werden. Deshalb beschränken sich die folgenden Kapitel auf Darstellung der Gründe für die erfolgten oder ausgelassenen Unsicherheitsbewertungen und der damit verbundenen Schwierigkeiten.

### 7.2.1 Unsicherheit der Grundlagedaten

Grundlagedaten werden gemäss angepasster Verordnung zur Landesgeologie (LGeoIV, Art. 2) neu in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Primäre geologische Daten: Daten im Sinne von Messungen oder direkten Beschreibungen, Aufnahmen, Dokumentationen geologischer Eigenschaften, namentlich unprozessierte Signale und Messwerte, lithologische und geotechnische Beschreibungen von Bohrkernen und Bohrklein, Aufschlusskartierungen, Laboranalysen;
- Prozessierte primäre geologische Daten: primäre geologische Daten, die im Hinblick auf eine Interpretation aufbereitet wurden, namentlich prozessierte geophysikalische Daten, Bohrprofile;
- Sekundäre geologische Daten und Informationen: geologische Daten und Informationen, welche durch die Interpretation von primären oder prozessierten primären geologischen Daten entstehen, namentlich Interpretationen von geophysikalischen Daten, geologische Karten, geologische Profilschnitte, geologische Modelle.

An jedem Punkt im Raum sollte für ein geologisches 3D-Modell die Unsicherheit angegeben werden können. Der Bewertung und Beschreibung der mit allen Eingangsdaten verbundenen Unsicherheit kommt daher grosse Bedeutung zu, konnte aber aus Kapazitätsgründen nicht bei allen verwendeten Daten, geschweige denn einer Kombination der Unsicherheit aller verwendeten Daten, durchgeführt werden. Mit der folgenden Übersicht soll das Bewusstsein der Nutzer von geologischen 3D-Modellen gefördert werden, dass die Unsicherheitsbetrachtung bereits bei den verwendeten Grundlagedaten beginnen muss – und nicht erst bei den Resultaten.

#### 7.2.1.1 Primäre geologische Daten

Im Projekt GeoMol wurden keine primären geologischen Daten bearbeitet oder verwendet.

#### 7.2.1.2 Prozessierte primäre geologische Daten

Für die Erstellung von GeoMol15 und GeoMol17 standen folgende prozessierte primäre geologische Daten zur Verfügung:

- Seismische Sektionen (prozessiert): Die von den Datenherren übernommenen Daten unterscheiden sich stark hinsichtlich Qualität, Alter und Aufnahmeweck (Kap. 7.1.2.3) sowie der angewandten ursprünglichen Prozessierungsschritte. Auf eine Unsicherheitsabschätzung wurde

im Projekt GeoMol verzichtet, vor allem deshalb, weil für die GeoMol-Projektteams in der Regel kein Einblick in die Aspekte der seismischen Datenakquisition und Datenverarbeitung gegeben war, welcher für derartige Abschätzung wesentlich wäre.

- Bohrdaten: Die Unsicherheit der Bohrung selber wurde in GeoMol nicht anhand der Bohrprofile (enthaltene geologische Informationen), sondern mit einer Abschätzung der technischen Unsicherheit (Koordination, Tiefe der Horizonte, Schichteneinfallen) beschrieben (LANDESGEOLOGIE 2014).

### 7.2.1.3 Sekundäre geologische Daten und Informationen

Geologische Daten und Produkte können nicht ohne die Arbeit von entsprechend ausgebildeten Personen aufgenommen beziehungsweise produziert werden. Im Lauf der Zeit haben sich Lehrmeinungen gebildet, geologische Konzepte wurden entwickelt und/oder verändert und die Datenqualität erheblich verbessert. Die einzelnen Fachpersonen sehen sich in unterschiedlichem Ausmass diesen Veränderungen ausgesetzt. Das geologische Fachwissen ist nicht homogen verteilt und wird durch die vorherrschenden Lehrmeinungen beeinflusst. Deswegen gilt für alle sekundären geologischen Daten und Informationen, dass die mit dem geologischen Wissen der bearbeitenden Personen verbundene Unsicherheit oft nicht oder nur schwierig quantifiziert werden kann (z.B. BOND et al. 2007, 2015, GUNNINK et al. 2010).

Im Projekt GeoMol wurden folgende sekundäre geologische Daten verwendet:

- Geologische Profile: Für die Erstellung eines geologischen Profils werden prozessierte primäre geologische Daten von Fachleuten interpretiert und in einen Zusammenhang gestellt. Das vorhandene Expertenwissen der bearbeitenden Person spielt dabei, neben der Art, Menge und Qualität der Datengrundlage, eine entscheidende Rolle. Für die Modellerstellung in GeoMol wurden Profile aus dem GA25 und anderen Quellen nach verschiedenen Kriterien hinsichtlich der Verwendbarkeit für die Modellierung (z.B. Lage, Georeferenzierung, Stratigraphie) geprüft und bewertet. Auf eine weitergehende Unsicherheitsabschätzung wurde verzichtet.
- Seismische Sektionen (interpretiert): Die generelle Unsicherheit von seismischen Daten wird in MEIER et al. (2014) beschrieben: «Von grosser Bedeutung sind [...] die Ungewissheiten von Tiefenangaben von geologisch interpretierten seismischen Horizonten. Diese Ungewissheiten ergeben sich aus den unterschiedlichen Arbeitsschritten der Datenverarbeitung und -interpretation, wie z.B. Statik-Korrekturen bei der Datenverarbeitung in Zeit, Interpretationsungewissheiten aufgrund geologischer Komplexität oder ungünstigem seismischem Abbild und vor allem auch Ungewissheiten des Geschwindigkeitsmodells, welches der Tiefenkonvertierung zugrunde liegt». In GeoMol wurde aus den oben erwähnten Gründen keine Abschätzung der Unsicherheit für die Interpretationen seismischer Sektionen durchgeführt.

- Rasterdaten (z.B. Karten, Höhenmodelle, Orthophotos): Geologische Karten wurden verwendet, um die darin enthaltenen geologischen Informationen in GeoMol15 und GeoMol17 zu integrieren. Die Informationen konnten entweder als Vektordaten verwendet oder mussten manuell digitalisiert werden. Im letzteren Fall steht die räumliche Auflösung der Rasterdaten in direktem Zusammenhang mit dem Genauigkeitsverlust während der manuellen Digitalisierung (BAUMBERGER 2015). Es wurde keine Unsicherheitsabschätzung der verwendeten Rasterdaten vorgenommen.
- 2D-Vektordaten: Für GeoMol wurden hauptsächlich Vektordaten der Produkte von swisstopo verwendet (GeoCover, Geokarten 500 usw.). Die in diesen Daten verwendeten Punktabstände waren für die Verwendung in der geologischen 3D-Modellierung zu dicht und mussten vergrössert werden (Fig. 7-2). Für die Anpassung der modellierten Störungszonen und Horizonte an die Vektordaten wurden letztere auf das Höhenmodell swissALTI<sup>3D</sup> (SWISSTOPO 2017) projiziert. Die damit eingeführte Unsicherheit ist abhängig von der Punktdichte der projizierten Linien und der Auflösung des Höhenmodells (BAUMBERGER 2015, s. a. Fig. 7-2). Für die Vektordaten wurde keine Abschätzung der Unsicherheit durchgeführt.

### 7.2.2 Unsicherheiten der Resultate

Sowohl GeoMol15 als auch GeoMol17 stellen Momentaufnahmen dar. Sie wurden zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem klar definierten Datensatz und dem vorhandenen geologischen Konzept für einen bestimmten Zweck erstellt. Für die Herstellung beider Modelle wurden verschiedene Datentypen miteinander in einen Zusammenhang gebracht und kombiniert. Die verwendeten Eingangsdaten weisen einen unterschiedlichen Grad an Qualität und Unsicherheit auf, der nur mit viel Aufwand oder gar nicht quantifiziert werden kann (Kap. 7.2). Ein Unsicherheitsmodell für GeoMol Schweiz müsste demnach auf nicht oder nur unzulänglich beschreibbaren Unsicherheiten aufbauen.

Im Projektverlauf konnte eine geeignete Methode zur Beschreibung der Unsicherheit der kombinierten Grundlagendaten und somit für geologische 3D-Modelle weder erarbeitet noch gefunden werden. Deswegen wurde für GeoMol Schweiz darauf verzichtet, für die Resultate die Unsicherheit numerisch zu berechnen. Die numerische Berechnung der Unsicherheit bringt mindestens zwei Schwierigkeiten mit sich. Einerseits trägt sie nicht dazu bei, die Unsicherheiten zu reduzieren, da aufgrund der Vielfalt der Eingangsdaten («harte» Daten, Interpretationen) die Interpretationen und Unsicherheiten von indirekt gewonnenen Daten für die Berechnung der Gesamtunsicherheit hinzugezogen werden müsste. Andererseits muss sie sich auf relative Unsicherheiten beschränken, da absolute Unsicherheiten (z.B. Abweichungen in Metern) eine Verlässlichkeit des Modells implizieren, die es gar nicht bieten kann. Beides wirkt dem Ziel entgegen, dem Nutzer verlässliche Angaben über Genauigkeit und Anwendungsmöglichkeit eines Modells zu machen.

## Punktdichte

X-Z-Diagramm der Überschiebung «Kronberg-Süd»

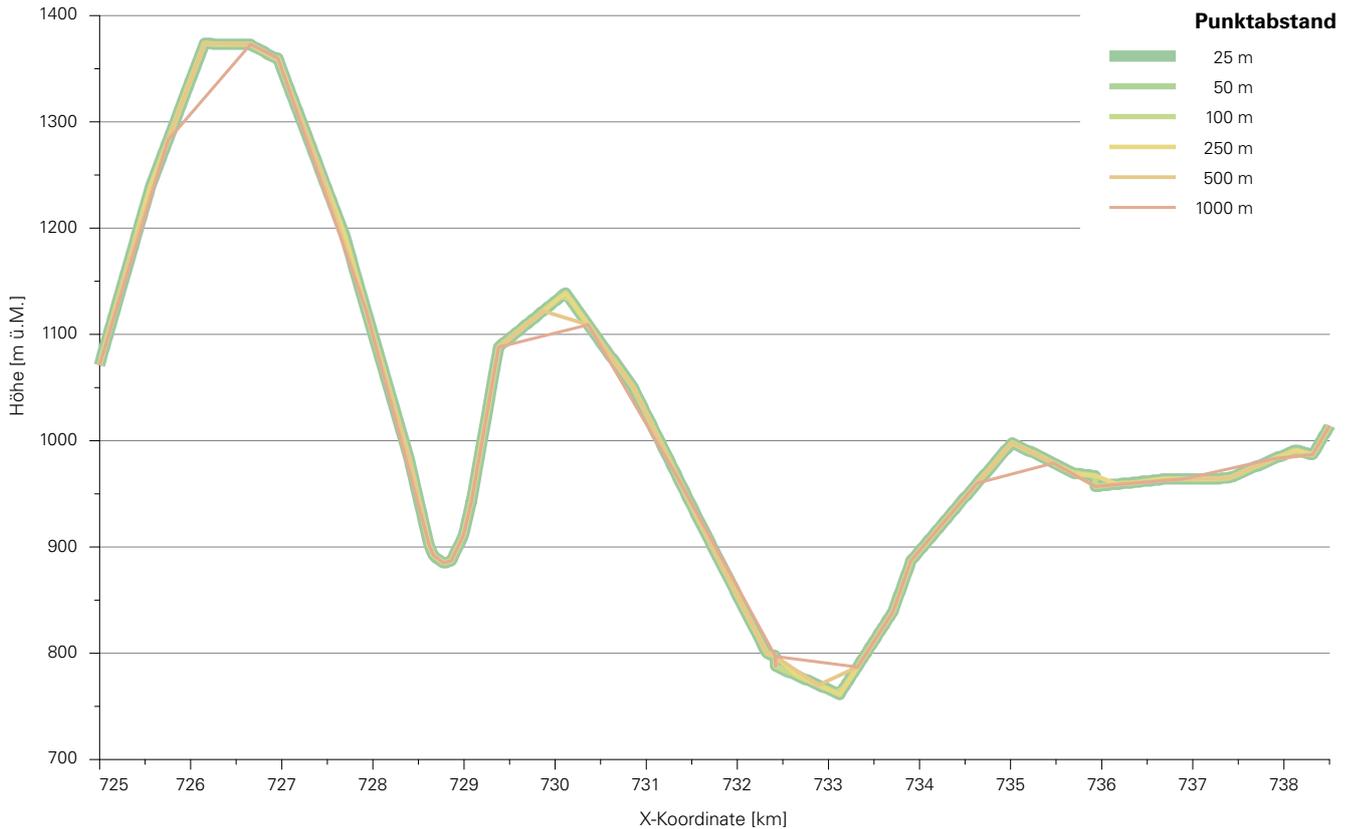


Fig. 7-2: X-Z-Diagramm der Überschiebung «Kronberg-Süd» mit Knotenpunktverteilungen mit unterschiedlichen Abständen (25 m, 50 m, 100 m, 250 m, 500 m und 1000 m). Ein 25-m-Punktabstand stellt den Linienverlauf mit vielen Punkten (612) sehr detailliert dar und dient für diese Untersuchung als Referenzlinie. Punktabstände von 50 m, 100 m und 250 m zeigen mit viel weniger Daten einen ähnlichen Linienverlauf wie die Referenzlinie auf. Hingegen wird der Linienverlauf ab einem Punktabstand von 500 m für die Anforderungen von GeoMol zu stark vereinfacht dargestellt (nach dem Ansatz von BAUMBERGER 2015).

Die Autoren unterstützen die Meinung, dass in einem geologischen 3D-Modell an jedem Punkt Angaben betreffend dessen Unsicherheit vorhanden sein sollten. Dies war aber mit dem gewählten Vorgehen und in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich.

Anstelle eines Unsicherheitsmodells wurde mit den Datenübersichtskarten (Kap. 4.1) eine Methode erarbeitet, die es dem Nutzer erlaubt, Aussagen über die Verlässlichkeit der modellierten Horizonte aus GeoMol17 abzuleiten.

## 8. Anwendungen

Die beiden geologischen 3D-Modelle GeoMol15 und GeoMol17 können für verschiedene Zwecke verwendet werden: Für die Visualisierung und Kommunikation von geologischen Gegebenheiten, als erste grobe Planungsgrundlage für Infrastrukturprojekte, für die Beschreibung und Bestimmung von Potenzialen des Untergrunds und als Hilfsmittel für das Ressourcenmanagement im Rohstoff- und Energiebereich. Der Detaillierungsgrad beider Modelle ist ihrem geplanten Verwendungszweck auf regionaler Ebene angepasst. In GeoMol15 wurden Störungzonen, Versätze und Horizonte vereinfacht dargestellt beziehungsweise nicht berücksichtigt. In GeoMol17 wurden dieselben Elemente detaillierter modelliert. Beide Modelle können aufgrund ihrer regionalen Abdeckung ohne Hinzufügen von weiteren Daten nicht für lokale Detailstudien verwendet werden.

Dieses Kapitel beschreibt die im Molassebecken vorhandenen Geopotenziale und Anwendungsbeispiele für die beiden dreidimensionalen geologischen Modelle.

### 8.1 Anwendung in der Kommunikation und Visualisierung

Geologie ist per Definition dreidimensional; ihre 3D-Visualisierung eröffnet faszinierende Möglichkeiten für die Kommunikation und Interaktion zwischen Fachpersonen und Laien. Die Einschränkungen der geologischen 3D-Modelle müssen aber zwingend berücksichtigt werden. So ist es für viele Interessenten nicht immer einfach, solche Modelle visuell zu erfassen und auch zu verstehen. Andererseits können vereinfachte Darstellungen von geologischen Zusammenhängen praxisnahe Unterstützung leisten; beispielsweise bei Entscheidungsprozessen in Wirtschaft und Verwaltung. Solche Verwendung wird in Zukunft umso wichtiger, je häufiger Nutzungskonflikte zwischen konkurrierenden Geopotenzialen auftreten. Die Fachpersonen müssen deshalb ihr Wissen über den Untergrund und dessen Aufbau auf einfache Art und Weise den Nicht-Fachpersonen verständlich machen. Es bestehen damit zwei Herausforderungen: Erstens müssen korrekte und informative geologische 3D-Modelle erstellt werden. Zweitens sollen diese einem möglichst breiten Publikum zugänglich gemacht werden.

Die beiden Modelle GeoMol15 und GeoMol17 können nicht nur für die Analyse und Visualisierung von konkreten Fragestellungen in Entscheidungsprozessen eingesetzt werden. Einsatzmöglichkeiten bestehen auch in der Darstellung von geologischen Daten und Zusammenhängen in der Forschung, im Schulunterricht oder in Museen. Damit die geologischen 3D-Modelle zielgruppengerecht angeboten wer-

den können, sind sie auf verschiedenen Plattformen verfügbar: Für Nicht-Fachpersonen auf dem Geodatenportal des Bundes ([map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch)) und für Fachpersonen und Experten in einem spezialisierten 3D-Datenviewer (<https://viewer.geomol.ch>; s. a. Kap. 9.1).

### 8.2 Anwendung in der Projektplanung

Projekte, welche auf einer Erkundung des Untergrunds beruhen (z.B. Energiegewinnung, Lagerung von Abfällen, Infrastruktur) sind zeit- und kostenintensiv. Neben den rein fachlich-technischen Fragestellungen (z.B. geologische Gegebenheiten, Technik, Ingenieur- und Bauwesen) gilt es auch andere, komplementäre Themen zu bearbeiten (z.B. Wirtschaftlichkeit, Kosten-Nutzen-Verhältnis, Umweltverträglichkeit). Figur 8-1 zeigt einen schematischen Ablauf einer Projektplanung und einer kumulierten Kostenplanung für ein hypothetisches Geothermieprojekt. Es ist zu beachten, dass sowohl Zeit- als auch Kostenplanung projektspezifisch variieren können.

Gemäss Figur 8-1 steigen die Kosten mit Beginn der Explorationsphase stark an, die vorgelagerten Projektphasen (Vorstudie und Machbarkeitsstudie) erscheinen dazu im Vergleich relativ kostengünstig. Die Gesamtinvestitionen für das erfolgreiche Geothermieprojekt Unterhaching bei München betragen ca. EUR 80 Mio. (VON HARTMANN et al. 2015), wogegen für die abgebrochenen Projekte in Basel und St. Gallen Kosten in der Höhe von je ca. CHF 60 Mio. (Onlinereports<sup>3</sup>; STADT ST. GALLEN 2014) angefallen sind.

Das blosse Vorhandensein von geologischen 3D-Modellen in einer Standortregion garantiert noch keinen Erfolg eines Projekts. Die 3D-Modelle bieten aber den Vorteil, dass in der Vorstudie und der Machbarkeitsstudie die geologischen Gegebenheiten schneller erfasst und dargestellt werden können. Dadurch lassen sich bereits in diesem Projektstadium geologisch-technische Fragen schneller und zu einem günstigeren Preis beantworten.

GeoMol15 und GeoMol17 können bereits in frühen Phasen als Studien-Grundlagen bei Projekten unterschiedlichster Ausrichtung beigezogen werden. Die strukturellen und geometrischen 3D-Grundlagen erlauben es zudem, das Erkundungs- und Explorationsprogramm gezielter auszurichten, was wiederum Kosten und Zeit einspart. Neue geologische Daten, die im Rahmen eines Projekts erarbeitet wurden, können in das bereits existierende Modell integriert werden. Damit kann das geologische Modell laufend

<sup>3</sup> <http://archiv.onlinereports.ch/2006/GeothermieErdbebenMedienkon.htm>; Zugriff am 23.03.2017.

## Verlauf eines hypothetischen Geothermieprojekts

Kostenverlauf mit der Zeit

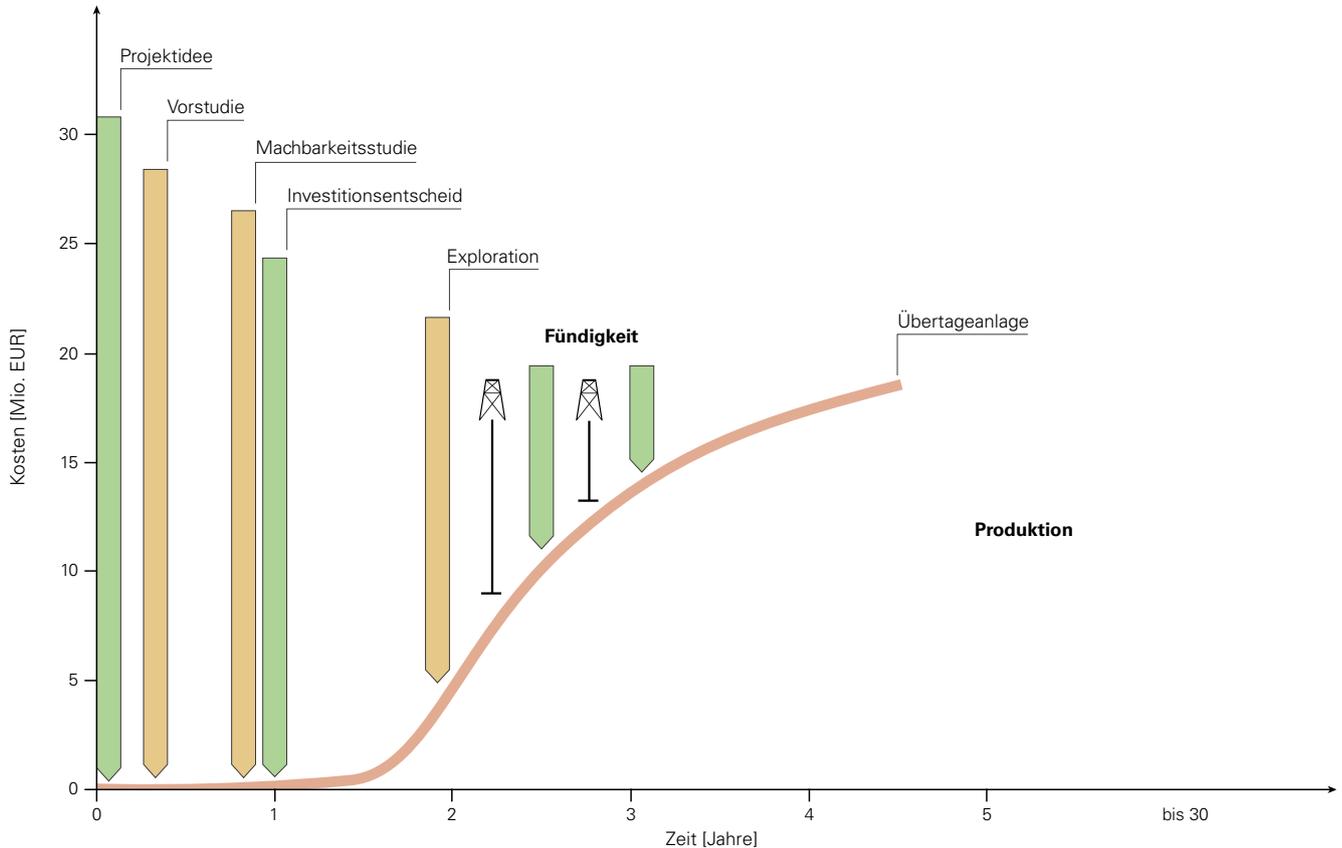


Fig. 8-1: Schematische Planung eines hypothetischen Geothermieprojekts. Kosten und die für die Realisierung benötigte Zeit können projektspezifisch stark variieren (VON HARTMANN et al. 2015, überarbeitet).

verbessert werden. Dieses Vorgehen wird mit dem Programm «Geothermie 2020» im Kanton Genf bereits umgesetzt (Fig. 8-2). Zu wesentlichen Teilen basiert dieses Projekt auf dem 3D-Modell, das im Rahmen des GeoMol-EU-Projekts erstellt wurde. Das bestehende 3D-Modell wird während der Erkundungsphase anhand von zusätzlichen, neu aufgenommenen Daten (v. a. Seismik, Tiefbohrungen) angepasst und verfeinert. Auch die Planungen der Geothermieprojekte in der Region La Côte und Lausanne konnten bereits von GeoMol15 profitieren.

### 8.3 Anwendung zur Beurteilung von Nutzungskonflikten

Dreidimensionale Raumplanung wird für die zunehmende Nutzung des Untergrunds eine Hauptrolle spielen (BAUMBERGER et al. 2015). Dafür werden nicht nur entsprechende gesetzliche Bestimmungen benötigt. Bestehende und zukünftige Konzepte wie der unbemannte Gütertransport (s. u.) oder Deep Cities (PARRIAUX et al. 2010) verlangen nach detaillierten geologischen Grundlagedaten. Diese müssen schnell, einfach, möglichst günstig, jederzeit und in guter Qualität verfügbar sein. Das Interesse an der Nutzung der vorhandenen Geopotenziale ist heute noch überwiegend sek-

toriell. Das heisst, dass sich das Augenmerk vor allem auf die Verhinderung von Konflikten innerhalb derselben Nutzungsart (z.B. Geothermie) richtet. Die konkurrierende Nutzung von Geopotenzialen (z.B. Energiegewinnung vs. Lagerung von Abfällen) wird heute nur unter Fachleuten diskutiert. Um die Potenziale im Untergrund zukünftig optimal nutzen zu können, muss die Nutzung des Untergrunds zukünftig nutzungsübergreifend und tiefenabhängig betrachtet werden. Mit der Zunahme von konkurrierenden Nutzungen des Untergrunds sind auch die Anforderungen an die Bewilligungsverfahren gestiegen. In der Konsequenz hat die öffentliche Verfügbarkeit von verlässlichen geologischen Daten stark an Wichtigkeit gewonnen. Die Resultate aus GeoMol leisten in mehrfacher Hinsicht einen Beitrag dazu:

- In Planungs- und Bewilligungsverfahren können Entscheidungsgrundlagen schneller, einfacher und fundierter erarbeitet werden.
- Entscheidungsträger, Planer und Planungsbehörden, Bauherrschaften und die breite Öffentlichkeit erhalten einen einfach zugänglichen Einblick in den Untergrund des Schweizer Mittellandes.
- Die öffentliche Verfügbarkeit von GeoMol15 und GeoMol17 (ab Ende 2018) verbessert die Transparenz und die Akzeptanz von Projekten und politischen wie rechtlichen Verfahren.

- Durch die Visualisierung des Untergrunds wird das Verständnis für die Geologie und das Interesse an geologischen Fragestellungen gefördert.
- Die Möglichkeit zur Verwendung der verfügbaren Grundlagen führt zu einer vertieften Auseinandersetzung aller Personen, die bei der Nutzung und den daraus folgenden Risiken von Untergroundpotenzialen involviert sind.

Die erdwissenschaftlichen Fachpersonen werden zukünftig noch stärker gefordert sein, einfach verständliche Lösungen zu erarbeiten und kohärente Erklärungen zu liefern.

## 8.4 Anwendung «Charakterisierung von Geopotenzialen»

Geopotenziale beschreiben generell die natürlich vorkommenden Ressourcen der Erde unter Berücksichtigung ihrer Nutzbarkeit. Dies schliesst sowohl die nutzbaren und nicht-nutzbaren als auch die gefahrlosen und gefährlichen Ressourcen mit ein (z.B. MANHENKE 1999). Gefährliche Geopotenziale können auch als geologische Risiken betrachtet werden, welche die Nutzung der Geopotenziale einschränken oder ganz verunmöglichen. Zusätzlich wurden über die letzten Jahrhunderte (durch Ressourcenabbau und -nutzung vor allem im Primärsektor und Entsorgungs- und Bauwesen) anthropogene Geopotenziale geschaffen, welche nun selber als nutzbare Ressource dienen können, beispielsweise für Urban Mining (GEOMOL TEAM 2015).

Schätzungen zu Folge haben 60–80% aller Daten einen Raumbezug (WILLIAMS & VAN DEMARK 1987, COOPERS AND LYBRAND 1996, HAHMANN & BURGHARDT 2013). Viele der politischen, ökonomischen und wirtschaftlichen Entscheidungen basieren heutzutage auf räumlichen (2D-)Daten (WILLIAMS & VAN DEMARK 1987, SWISSTOPO 2004). Für Entscheidungen in der dritten Dimension fehlen bis anhin häufig die frei zugänglichen und verfügbaren dreidimensionalen Grundlagedaten. In den letzten Jahren haben sich die Ansprüche an den Untergrund und die Nutzung der vorhandenen sowie die Erforschung der vermuteten Geopotenziale (z.B. Infrastruktur, Energieproduktion, Abfalllagerung, Rohstoffe) immer differenzierter ausgeprägt. Mehrere Potenziale in der gleichen geologischen Formation führen zu Nutzungskonflikten. Diese können eine mögliche Grundlage für gesellschaftliche Auseinandersetzungen sein (BAUMBERGER & ALLENBACH 2016). Für die Identifikation und Charakterisierung von Geopotenzialen spielen neben der Lithostratigraphie auch viele andere Aspekte eine wichtige Rolle (z.B. Tiefenlage, tektonische Situation, lokale Ausprägung der Lithologie, Versenkungsgeschichte). Für die Bearbeitung von Nutzungskonflikten ist das Vorhandensein von dreidimensionalen geologischen Grundlagedaten deshalb von grösster Bedeutung.

### 8.4.1 Tiefengeothermie

Das Potenzial für Tiefengeothermie hängt von der vorhandenen Wärme in der Tiefe ab (in Korrelation zu Temperatur und Gesteinseigenschaften (LANDESGEOLOGIE in Vorb.)).

Die Nutzung wird ihrerseits von der technischen Machbarkeit der Wärmeabgewinnung in der Tiefe und dem Transport an die Oberfläche bestimmt (HIRSCHBERG et al. 2015). In der Schweiz sind grundsätzlich mehrere Formationen für die geothermische Nutzung geeignet, so beispielsweise der obere Malm, der Muschelkalk oder das kristalline Grundgebirge bis ca. 5500 m (LANDESGEOLOGIE in Vorb.). Dem theoretischen Potenzial steht das Fündigkeitsrisiko gegenüber, welches auf nicht beeinflussbare Faktoren wie etwa Temperatur, Permeabilität, Porosität oder Volumina der Aquifere beruht. Verlässliche Angaben dazu können aber nur mit direkten Messungen im Bohrloch gemacht werden (z.B. HIRSCHBERG et al. 2015). Damit bleibt immer ein Restrisiko bezüglich der Fündigkeit bestehen.

#### 8.4.1.1 Nutzungsmöglichkeiten

Erdwärme kann, je nach (hydro-)geologischen Voraussetzungen, für die Produktion von Wärme oder Strom genutzt werden:

- **Wärmeproduktion:** Im Prinzip funktionieren geothermische Produktionssysteme bei Temperaturen oberhalb von 70°C (entspricht, je nach geothermischem Gradient, einer Tiefe von etwas mehr als 2 km) analog den Erdwärmesonden im untiefen Untergrund. Solche Temperaturen erlauben es, Wärme ohne den Einsatz von Wärmepumpen zu produzieren (HIRSCHBERG et al. 2015). In der Schweiz sind dafür grundsätzlich die Sedimente der Kreide (LANDESGEOLOGIE in Vorb.), der obere Malm, die Schinznach-Formation (RYBACH 1992, SIGNORELLI et al. 2004, SIGNORELLI & KOHL 2006, BAUJARD et al. 2007) und das kristalline Grundgebirge (LANDESGEOLOGIE in Vorb.) geeignet.
- **Stromproduktion:** Für die Produktion von Strom mit Geothermie ist eine Zieltemperatur zwischen 120°C und 180°C notwendig (z.B. HIRSCHBERG et al. 2015, LANDESGEOLOGIE in Vorb.). Daraus folgt, dass unter Annahme eines geothermischen Gradienten von 30°C/km, eine Geothermiebohrung in eine Tiefe von 4 bis 6 km reichen muss. In dieser Tiefe sind die natürlichen geothermischen Ressourcen ausreichend vorhanden und werden (in den meisten Fällen) kontinuierlich erneuert. Der limitierende Faktor ist in diesem Fall das Vorhandensein von genügend Wasser (hydrothermale Geothermie) oder einer genügenden Gesteinsdurchlässigkeit (petrothermale Geothermie). Lokal besteht zudem das Risiko, dass die Ressourcen nach ca. 30 Jahren trotzdem verbraucht sein könnten (HIRSCHBERG et al. 2015). Verschiedene Autoren bezeichnen die Sedimente der Kreide, den oberen Malm, die Schinznach-Formation und das kristalline Grundgebirge als grundsätzlich geeignet, um Strom mit dem vorhandenen Geothermiepotenzial zu produzieren (RYBACH 1992, SIGNORELLI et al. 2004, SIGNORELLI & KOHL 2006, BAUJARD et al. 2007, LANDESGEOLOGIE in Vorb.).

#### 8.4.1.2 Anwendung GeoMol in der Pilotregion Genf–Savoyen

In dieser Pilotregion wurde die Nutzung des Untergrunds bezüglich Thermalwasser und Geothermie unter-

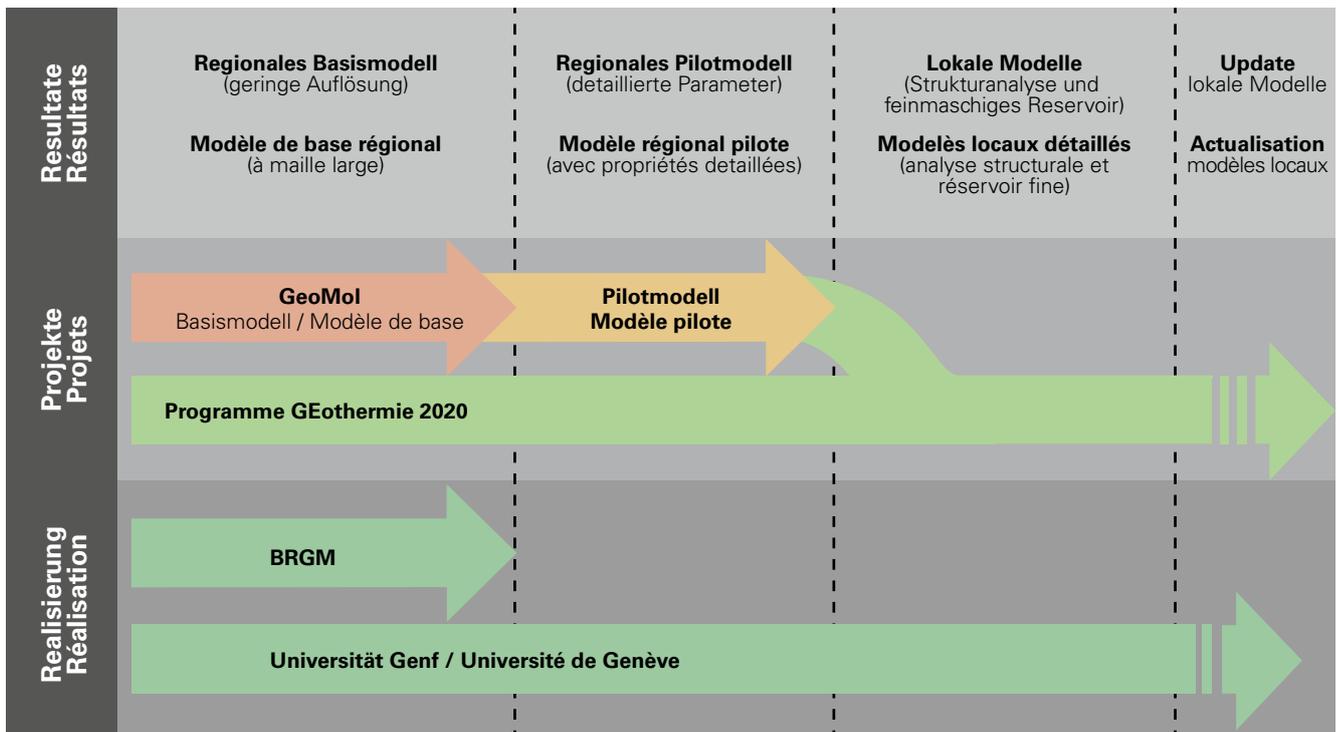


Fig. 8-2: Gemeinsamkeiten zwischen GeoMol und dem Programm «GEothermie 2020». GeoMol erarbeitete die Grundlagen für die weiteren Planungsarbeiten für das Erkundungsprogramm des Kantons Genf (Quelle: Kanton Genf, überarbeitet).

sucht. Dazu wurden für fünf Thermalquellen im Modellgebiet die hydrogeologischen Grundlagen zusammengetragen und visualisiert. Das Geothermiepotenzial wurde anhand einer Datenauswertung aus 15 Tiefbohrungen erstellt. Diese bildeten die Grundlage für die Berechnung eines 3D-Temperaturmodells (CAPAR et al. 2015).

GeoMol verfolgte dieselben Ziele wie das Programm «GEothermie 2020» des Kantons Genf ([www.geothermie2020.ch](http://www.geothermie2020.ch)): Verbesserung der Kenntnisse des Untergrunds, Präzisierung des Geothermiepotenzials und Definition der Nutzung (Prospektion, Exploration, Produktion) der verschiedenen Geopotenziale. Damit unterstützte GeoMol das Programm «GEothermie 2020» in der ersten Phase direkt, indem es die erforderlichen geologischen Grundlagen für die weitere Programmplanung bereitstellte (Fig. 8-2). Zusätzlich können die Resultate beispielsweise auch für die Kommunikation zwischen Fachleuten und Behörden oder zwischen den Behörden und der Bevölkerung genutzt werden. Ein weiterer Nutzen von GeoMol war die Schaffung einer grenzüberschreitenden, harmonisierten Datenbasis und der Etablierung der transnationalen Zusammenarbeit in der Grossregion Genf.

#### 8.4.1.3 Anwendung GeoMol in der Pilotregion Bodensee – Allgäu

Tief liegende Aquifere im bayerischen Teil der Pilotregion erlauben eine wirtschaftliche Erschliessung der Erdwärme, basierend auf einem nur durchschnittlichen geothermischen Gradienten (GEO-MOL LCA-PROJEKTTEAM 2015). Aus diesem Grund stellt die geothermische Nutzung das bedeutendste Nutzungspotenzial in dieser Pilotregion dar. Derzeit erfolgt

dort die Nutzung ausschliesslich durch die Erschliessung der tiefen thermalen Grundwasser über Brunnen, wobei 13 solcher Nutzungen in der Oberen Meeresmolasse und im Malm sowie eine energetische Nutzung im Malm beschrieben werden (GEO-MOL LCA-PROJEKTTEAM 2015).

GeoMol diente dazu, geologische Grundlagen für die Nutzung der Erdwärme für Thermalwasser und Geothermie zu harmonisieren. Dafür wurde in einem ersten Schritt ein geologisches 3D-Modell erstellt, um die Grundlagen zu beschreiben und zu visualisieren. In Kombination mit Temperaturdaten aus Tiefbohrungen wurde aus dem geologischen 3D-Modell ein 3D-Temperaturmodell berechnet. Daraus wurde eine Vielzahl von Karten generiert (Schichtlagerung, Mächtigkeit, Geopotenziale), welche unter der Webseite des GeoMol-EU-Projekts (<https://maps.geomol.eu>) abgerufen werden können. Die Karten dienen nicht nur der Visualisierung von geologischen Gegebenheiten, sondern auch der Kommunikation zwischen Fachpersonen und dem interessierten Publikum.

### 8.4.2 CO<sub>2</sub>-Speicherung

#### 8.4.2.1 Grundlagenstudie für das Schweizer Mittelland

DIAMOND et al. (2010) beschreiben für die Region Freiburg–Bern–Solothurn–Luzern ein hohes theoretisches Potenzial für die Speicherung von CO<sub>2</sub>. Die von diesen Autoren aufgrund von zweidimensionalen Grundlagen definierten potenziellen Speicher-Deckgesteinspaare wurden in 3D modelliert und dargestellt. Diese Arbeiten wurden im Rahmen des GeoMol-EU-Pilotprojekts «Schweizer Mittelland» (GEO-MOL TEAM 2015) durchgeführt.

## Pilotregion «Schweizer Mittelland»

Modelleinblick (vierfach überhöht)

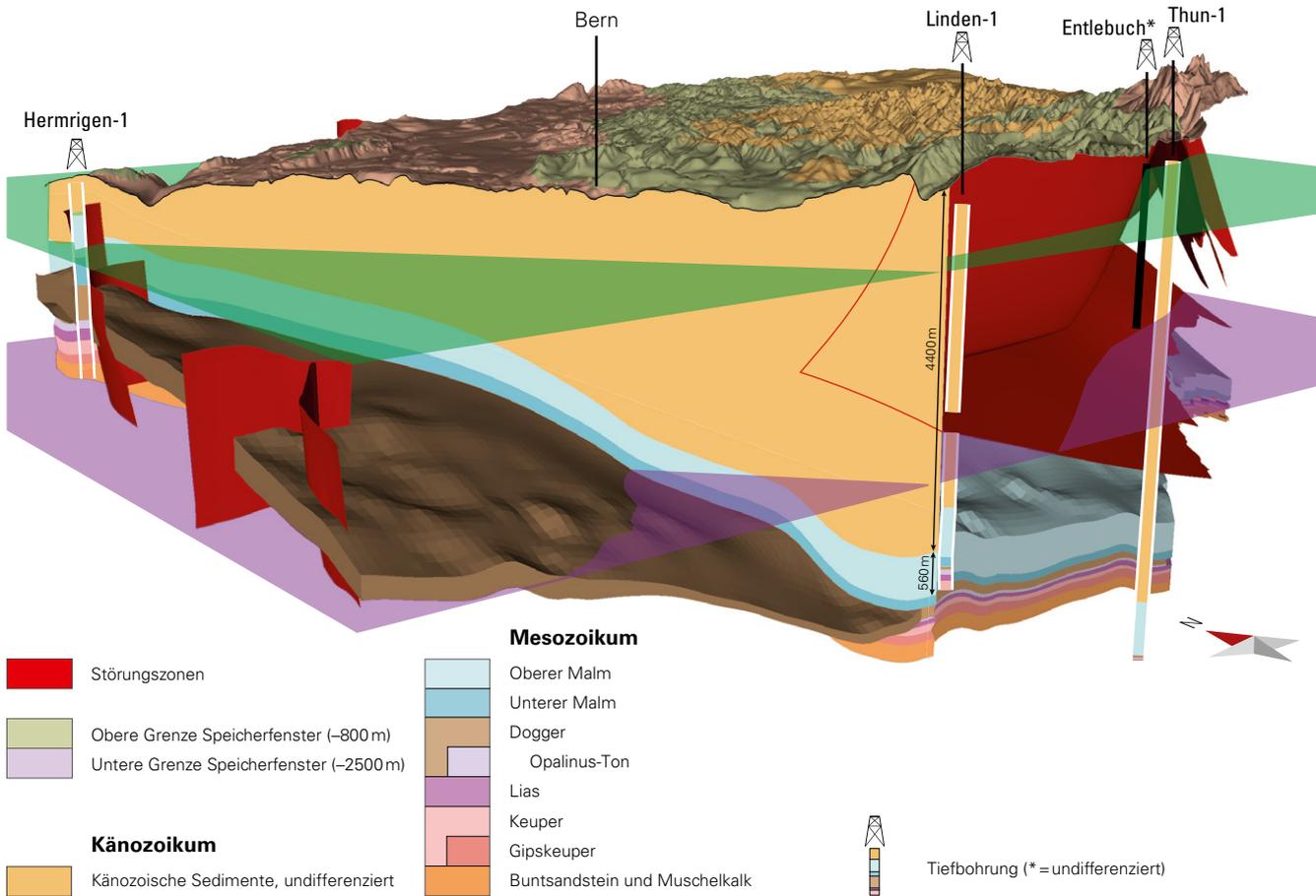


Fig. 8-3: Geologisches 3D-Modell der Region Freiburg–Bern–Solothurn–Luzern (vierfach überhöht). Der Verlauf des Doggers p.p. als potenzielles CO<sub>2</sub>-Speichergestein ist im Vordergrund als Volumenmodell (braun) dargestellt. Die dargestellten Störungszonen im Modell der Pilotregion stammen aus GeoMol 15. Die angegebenen Tiefbohrungen sind schematisch dargestellt. Die obere und untere Grenze des Speicherfensters für CO<sub>2</sub> (grüne und violette Flächen, vereinfacht dargestellt) zeigen an, in welcher Tiefe optimale Temperatur- und Druckverhältnisse für die Speicherung von CO<sub>2</sub> anzutreffen sind (DIAMOND et al. 2010).

### 8.4.2.2 Anwendung GeoMol

DIAMOND et al. (2010) stützten sich für die Bestimmung des Potenzials für die CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Schweiz auf die vorhandenen Datengrundlagen ab. Das 3D-Modell der Pilotregion «Schweizer Mittelland» (Fig. 8-3) liefert für die Region mit dem höchsten Speicherpotenzial die dreidimensionalen Grundlagen als Basis für weitere Forschung und detailliertere Studien. Die vorliegenden Resultate zeigen, dass die bestehenden geologischen Grundlagen in 2D und 3D nicht genügen, um eine belastbare Standortevaluation für die sichere und langfristige CO<sub>2</sub>-Speicherung durchführen zu können. Damit dies zukünftig geschehen kann, müssen weitere geologische Daten erhoben und Studien durchgeführt werden (z.B. CARMA<sup>4</sup> 2012, MAZZOTTI et al. 2013). Das Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE<sup>5</sup>) betreibt Grundlagenforschung und entwickelt innovative Lösungen unter anderem im Bereich

<sup>4</sup> CARMA (Carbon Management in Power Generation): Forschungsprojekt (2009-2012) mit dem Ziel, das Potenzial und die Machbarkeit von CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in der Schweiz zu untersuchen.

<sup>5</sup> <http://www.sccer-soe.ch/> (Zugriff am 04.04.2017)

CO<sub>2</sub>-Speicherung. Zukünftige Studien in der Schweiz sollten auch internationale Standards und Methoden für die CO<sub>2</sub>-Speicherung berücksichtigen (International Energy Agency Greenhouse Gas Research and Development Programme<sup>6</sup>). Parallel zur Erweiterung der Datengrundlage gilt es aber auch, rechtliche Abklärungen und Akzeptanztests in der Bevölkerung durchzuführen.

Die Kombination des 3D-Modells von GeoMol mit Resultaten von zusätzlichen Studien würde es erlauben, in einem spezifischen Gebiet eine gut beschriebene Datengrundlage aufzubauen, welche weitere Arbeiten zukünftig unterstützen kann.

### 8.4.3 Tiefengrundwässer

Tiefengrundwässer treten in allen grosstektonischen Einheiten der Schweiz auf, fließen grossräumig und mit geringer Geschwindigkeit und weisen gegenüber dem oberflächennahen Grundwasser eine erhöhte und jahreszeitenun-

<sup>6</sup> <http://www.ieaghg.org> (Zugriff am 04.04.2017)

abhängige Temperatur auf (WABER et al. 2015). Nach WABER et al. (2015) erfüllen Tiefengrundwässer mindestens drei der folgenden Kriterien: (1) Die Mineralisation erfolgt in tiefliegenden Gesteinseinheiten, (2) Auftreten einer erhöhten Temperatur ( $\Delta T > 5^\circ\text{C}$ ) gegenüber dem benachbarten oberflächennahen Grundwasser, (3) eine Verweilzeit von minimal mehreren Jahrzehnten und (4) lange Fließwege im Untergrund. Aufgrund ihrer Ausdehnung und damit dem mengenmässig starken Auftreten weisen die Tiefengrundwässer eine grosse ökonomische Bedeutung auf. Im Gegensatz dazu stehen die wenigen Kenntnisse über Menge und räumliche Lage der Tiefengrundwässer in der Schweiz (BURGER 2016).

#### 8.4.3.1 Anwendung GeoMol

Das Potenzial für Tiefengrundwässer wurde in GeoMol nur regional im nördlichen Teil des Kantons Aargau (mit Fokus Thermalwasser) bearbeitet. Gemäss REISDORF (2017) weisen Tiefengrundwässer in dieser Region hauptsächlich eine Zusammensetzung von Natrium-Sulfat-(Chlorid-Hydrogenkarbonat) beziehungsweise Natrium-(Calcium-)Chlorid-(Sulfat) auf (Aquifere in Buntsandstein, Permokarbon und Kristallin). Alle untersuchten Proben stammen aus Bohrungen, welche im «Einflussbereich» des Nordschweizer Permokarbontrögs liegen. In zwei Fällen wurden Wassertemperaturen gemessen, welche als hyperthermale Wässer ( $>37^\circ\text{C}$ ) zu bezeichnen sind: Zurzach ( $37.8\text{--}39.5^\circ\text{C}$ ; Kristallin; nördliche Trogschulter) und Riniken ( $29.4\text{--}70.0^\circ\text{C}$ ; Permokarbon; Troginneres). Beide Bohrungen weisen für diese Aquifere die oben genannten chemischen Zusammensetzungen auf (REISDORF 2017). Es besteht eine geographische Übereinstimmung zwischen dem Verlauf des Nordschweizer Permokarbontrögs, den Warmwasseraustritten und der Mineralisation der Thermalwässer. Somit ist ein Einfluss des Nordschweizer Permokarbontrögs und der damit verbundenen Störungen auf die Wasserzirkulation zu vermuten (REISDORF pers. Mitt.). Aufgrund des kleinen Untersuchungsgebiets ist es nicht möglich, anhand von kaltem oder wenig mineralisiertem Wasser die Zirkulation auszuschliessen. Dazu müsste eine detailliertere Untersuchung durchgeführt werden.

Die geologischen 3D-Modelle des Schweizer Molassebeckens (GeoMol15 und GeoMol17) können für die Grundlagenforschung zur Ausdehnung und Quantität von Tiefengrundwässern genutzt werden. Mithilfe der 3D-Modelle wird es möglich sein, die geometrische und räumliche Ausdehnung von tiefen Aquiferen und Aquitarden darzustellen. Zusätzlich kann unter Verwendung von Gesteinsparametern auch eine Mengenabschätzung erfolgen. Auf dieser Basis können Studien zum Nutzungspotenzial von Tiefengrundwässern erfolgen und Analysen zu den besprochenen Nutzungskonflikten durchgeführt werden.

#### 8.4.4 Geologische Risiken

Geologische Risiken umfassen alle Naturereignisse, welche durch geologische Prozesse verursacht werden, wie etwa Erdbeben, Vulkanausbrüche, Massenbewegungen (Rutschungen, Steinschlag) oder Überschwemmungen. Die Modelle GeoMol15 und GeoMol17 fokussieren auf den tiefen Untergrund. Mit dieser Einschränkung sind natürliche und

induzierte Erdbeben und damit verbundene Folgen das bedeutendste geologische Risiko im Schweizer Mittelland. Zwar sind durch Personen spürbare Ereignisse eher selten, treten aber dennoch regelmässig auf. Für 2016 führt der Schweizerische Erdbebendienst (<http://seismo.ethz.ch>) über 900 Erdbeben auf, davon 30 mit einer Magnitude von 2.5 oder grösser. FÄH et al. (2011) zeigen anhand von historischen Erdbebendaten und paläoseismischen Aufzeichnungen, dass Ereignisse mit einer Magnitude von 6 in der Schweiz im Mittel alle 50 bis 150 Jahre auftreten.

##### 8.4.4.1 Übersicht über das Schweizer Molassebecken

Das Schweizer Molassebecken liegt geographisch zwischen den Alpen und dem Jura. Kontinuierlich ablaufende tektonische Prozesse und die damit verbundene, stetig andauernde Hebung der Alpen sorgen für regelmässige Erdbeben. Dort, wo sich auftretende Spannungen nicht in Erdbeben entladen, baut sich im Untergrund ein Spannungsfeld auf, welches nur indirekt abgeschätzt werden kann (HERGERT et al. 2015). Das Wissen um das In-situ-Spannungsfeld ist für eine Vielzahl von Anwendungen in Forschung und Praxis wichtig (z.B. HEIDBACH & REINECKER 2013, HERGERT et al. 2015). Das Spannungsfeld wird hauptsächlich durch die herrschende Topographie (Relief und tektonische Überlast), das Auftreten von aktiven Störungszonen (Reduktion von Spannungen) und Elastizitätsunterschiede in den mesozoischen Sedimenten beeinflusst (HERGERT et al. 2015). Auf natürlichem Weg vorgespannte geologische Störungen sind einerseits Orte, wo natürliche Erdbeben vorzugsweise auftreten können. Andererseits fokussieren Geothermieprojekte im tiefen Untergrund auf durchlässige Gesteinsformationen und Störungszonen, wo idealerweise bereits Wasser fliesst. Reservoirstimulationen in der Nähe von solchen Störungen oder direkt in einer Störung können induzierte Erdbeben verursachen, wie sie während dem Geothermieprojekt in Basel (2006) aufgetreten sind (HIRSCHBERG et al. 2015). In St.Gallen ereignete sich 2013 ein Erdbeben, nachdem zusätzlich Wasser und Bohrschlamm in das Bohrloch eingeführt wurde. Letzteres war notwendig, da Gas in das Bohrloch entwichen war und einen Überdruck verursacht hatte (HIRSCHBERG et al. 2015).

Neben den direkten Schäden durch Erschütterungen bilden die erdbebeninduzierten Phänomene (z.B. Bodenverflüssigung, Rutschungen, Tsunamis) ein besonderes Risiko. Bodenverflüssigung betrifft im Modellgebiet von GeoMol vor allem die glazial überprägten und übertieften Täler im Mittelland. Diese sind mit quartären Lockergesteinen gefüllt, welche als Folge von Erschütterungen besonders einfach in Bewegung geraten können. Aber auch durch induzierte Erdbeben ausgelöste Bergstürze, die in Seen stürzen, können katastrophale Flutwellen auslösen (SIEGENTHALER et al. 1987, BUSSMANN & ANSELMETTI 2010).

Das Erdbebenrisiko ist definiert als Kombination mehrerer Faktoren (HIRSCHBERG et al. 2015):

- Erdbebengefährdung,
- lokale geologische Gegebenheiten,
- Generelles Gefahrenpotenzial (z.B. Bevölkerungsdichte),
- Verletzbarkeit von Infrastruktur.

## Störungszonen und Erdbebenzentren

Deckgebirge  
GeoMol17

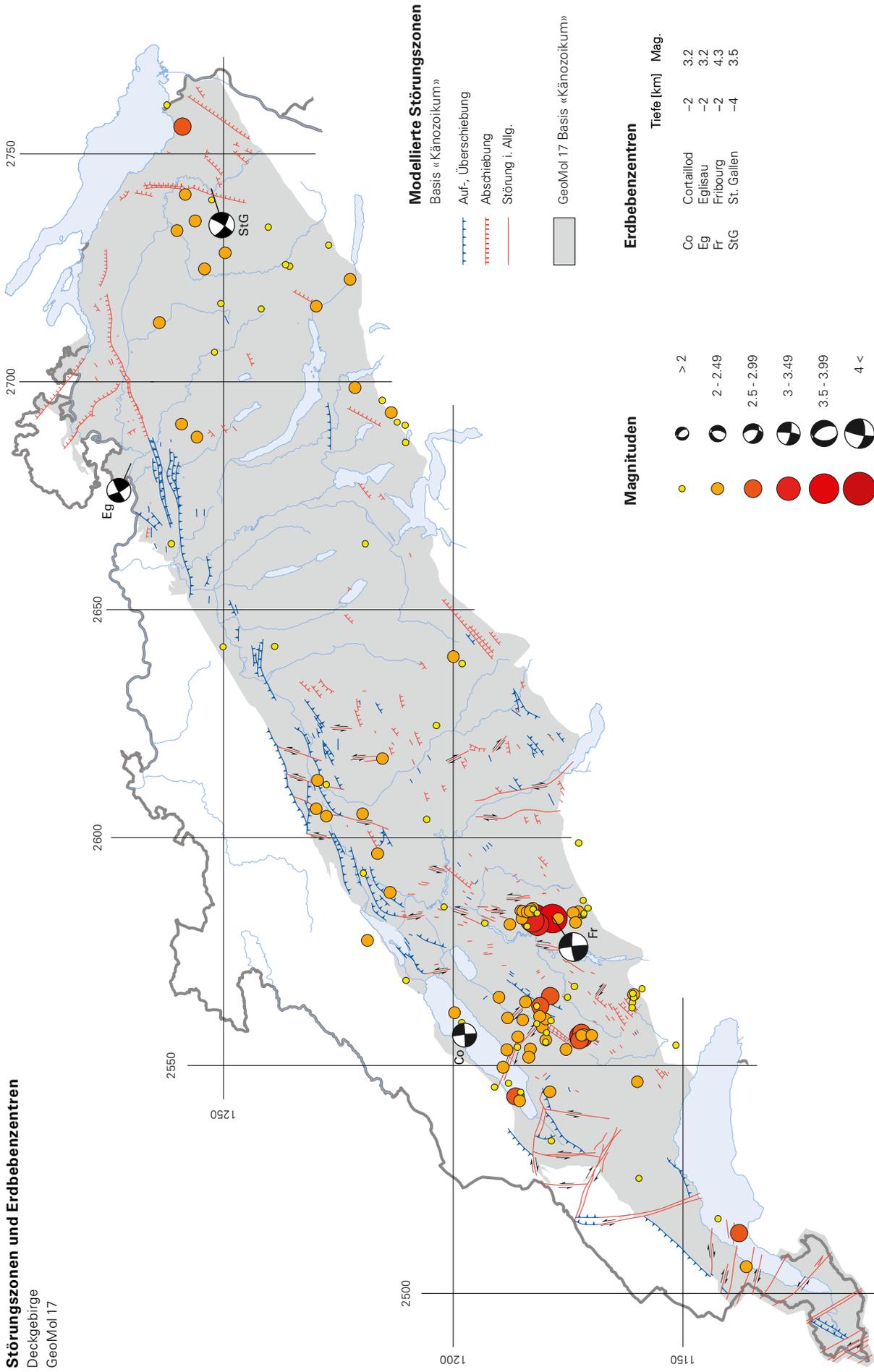


Fig. 8-4: Darstellung der Erdbebenzentren (Magnitude >2) im Deckgebirge vor dem Hintergrund des Störungsmodells von GeoMol17 auf der Höhe Basis «Känozoikum». Die Erdbebenzentren wurden mithilfe des in GeoMol17 modellierten Basis-«Mesozoikum»-Horizonts aussortiert. Im Modellgebiet von GeoMol bestehen gute Korrelationen zwischen der Lage von Störungen und dem Auftreten von Erdbeben in den Regionen südlich des Neuenburgersee, Freiburg, Solothurn und St. Gallen. Erdbebenkatalog ECCOS-09 (FAH et. al 2011). Stand der Daten: 1975-2008. Herdmechanismen (DEICHMANN et. al. 2000, BAER et al. 2007, DIEHL et al. 2014).

**Störungszonen und Erdbebenzentren**  
Grundgebirge  
GeoMol 17

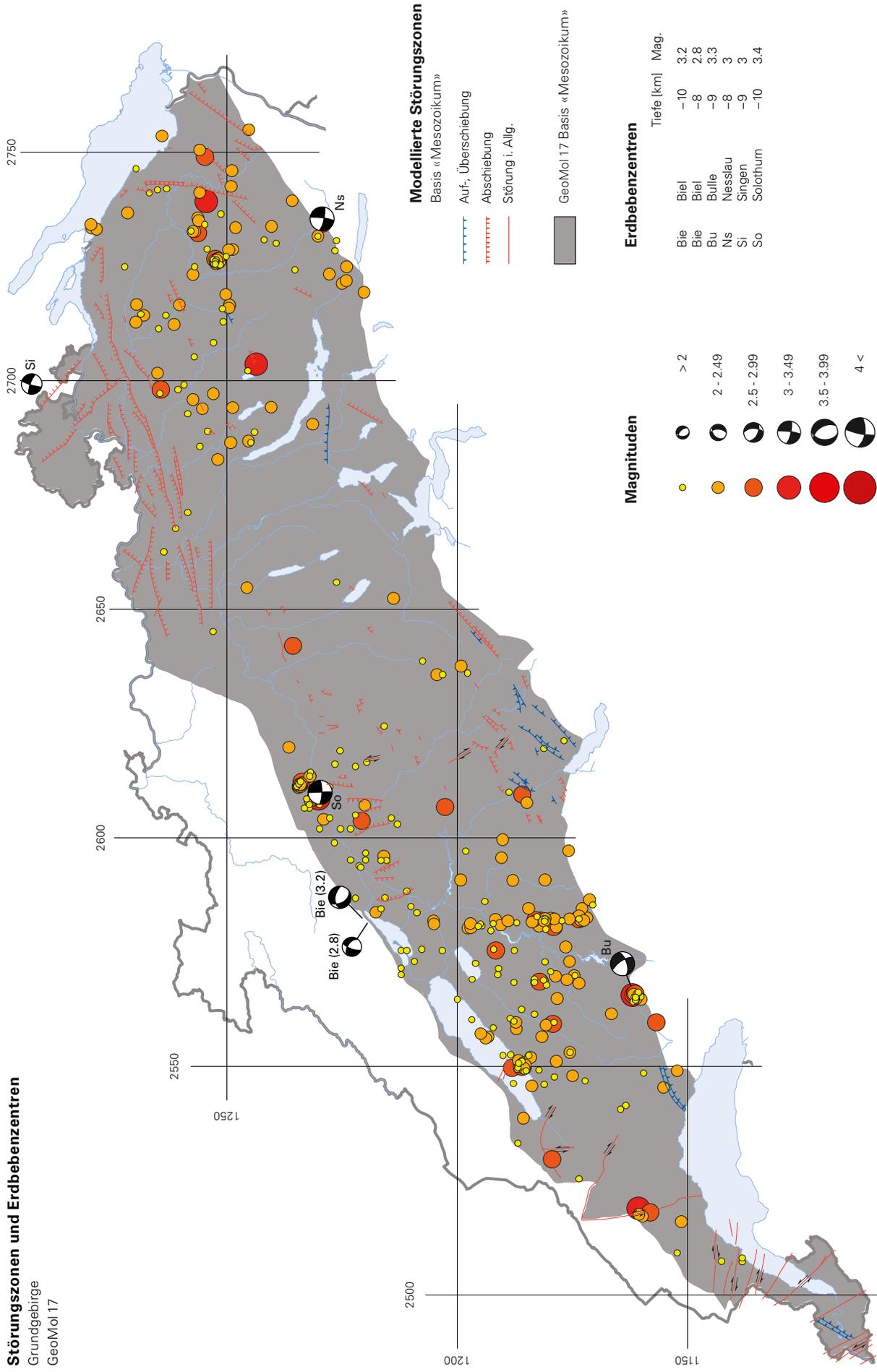


Fig. 8-5: Darstellung der Erdbebenzentren (Magnitudo >2) im Grundgebirge (bis -15 km) vor dem Hintergrund des Störungsmodells von GeoMol17 auf der Höhe Basis «Mesozoikum». Die Erdbebenzentren wurden mithilfe des in GeoMol17 modellierten Basis-«Mesozoikum»-Horizonts aussortiert. Erdbebenkatalog ECOS-09 (FÄH et. al 2011). Stand der Daten: 1975–2008. Herdmechanismen (BAER et al. 1997, BAER et al. 2001, DEICHMANN et al. 2004, BAER et al. 2005, DIEHL et al. 2015).

Daher muss klar zwischen Erbebengefährdung und Erdbebenrisiko unterschieden werden. So weisen Gebiete mit einer hohen Erbebengefährdung (z.B. Kanton Wallis oder Region Basel) ein lokal gleich grosses Risiko auf wie grosse Agglomerationen im Schweizer Mittelland (HIRSCHBERG et al. 2015).

#### 8.4.4.2 Anwendung GeoMol

Geologische Risiken wurden innerhalb GeoMol für die Schweiz nicht spezifisch bearbeitet. Im Rahmen des GeoMol-EU-Projekts lag der Schwerpunkt der Arbeiten in der Pilotregion Brescia–Mantova–Mirandola auf der Erdbebenrisikoaanalyse und Verbesserung der Erbebengefährdungsmodelle.

GeoMol15 und GeoMol17 stellen die regionalen struktureologischen Grundlagen in 3D bereit, welche im Bereich der Gefährdungs- und Risikoanalyse zur Verbesserung der Berechnungsgrundlagen sowie in der Seismotektonik verwendet werden können. Zusätzlich ist es möglich, mit den Störungskarten von GeoMol17 in Kombination mit der Lokalisierung von Erdbebenzentren aktive Störungszonen zu identifizieren (Fig. 8-4 u. Fig. 8-5).

#### 8.4.5 Kohlenwasserstoffe

Die Geschichte der Öl- und Gasprospektion in der Schweiz findet sich in LAHUSEN & WYSS (1995) und GISLER (2011). Bis heute wurden im Schweizer Mittelland nur kleine, ökonomisch nicht-nutzbare Gasvorkommen entdeckt. Entlebuch-1 war bisher die einzige Bohrung, mit der kommerziell rund 74 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas gefördert werden konnten (LAHUSEN & WYSS 1995). Neuere Untersuchungen (LEU 2014) zeigen hingegen, dass das Schweizer Mittelland Potenziale für die Gewinnung von konventionellen und nicht-konventionellen Kohlenwasserstoffen aufweist. Für die Nachweise der Wirtschaftlichkeit der genannten Potenziale sind vor allem für die Erdgasförderung (~25 Mia. m<sup>3</sup> aus Kohleflözen; 4,5–6,0 Mia. m<sup>3</sup> aus konventioneller Förderung; 50–65 Mia. m<sup>3</sup> aus den Permokarbonsedimenten) weitere Explorationsbohrungen zwingend nötig (LEU 2014). In einer demnächst erscheinenden Publikation gibt die LANDESGEOLOGIE (in Vorb.) einen Überblick über die theoretische Nutzbarkeit der gängigsten Potenziale, die beim heutigen Kenntnisstand zur Extraktion von Kohlenwasserstoffen und zur Nutzung der Tiefengeothermie in Frage kommen.

Das Potenzial für Kohlenwasserstoffe wurde in GeoMol nicht bearbeitet.

#### 8.4.6 Lagerung von radioaktiven Abfällen

Die radioaktiven Abfälle müssen in der Schweiz gemäss Kernenergiegesetz (KEG, Art. 31) von den Verursachern entsorgt werden. Die konkrete Standortsuche erfolgt im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager. Die Verfahrensleitung liegt beim Bund, die Nagra ist seit 1972 mit der Standortsuche für die sichere Lagerung der in der Schweiz bisher und zukünftig produzierten radioaktiven Abfälle und den damit verbundenen geologischen und technischen Abklärungen beauftragt ([www.nagra.ch](http://www.nagra.ch)).

Umfangreiche Abklärungen in den vergangenen Jahrzehnten haben ergeben, dass das Schweizer Mittelland das grösste Potenzial für den Bau von geologischen Tiefenlagern hat. Dabei erfüllen die folgenden Sedimente die grundsätzlichen Anforderungen an ein Wirtsgestein ([www.nagra.ch](http://www.nagra.ch)<sup>7</sup>): der Opalinus-Ton (Jura), die Passwang- und Klingnau-Formation (Jura), der Effingen-Member (Jura) und die mergeligen Formationen des Helvetikums (Kreide).

Das Potenzial für die Speicherung von radioaktiven Abfällen wurde in GeoMol nicht bearbeitet.

#### 8.4.7 Infrastrukturbauten

Im Schweizer Mittelland wurden bereits in der Vergangenheit regionale oder nationale Infrastrukturprojekte im Untergrund geplant. In den 1970er Jahren wurde die Idee der «Swissmetro» lanciert. Sowohl auf der Nord-Süd- als auch auf der West-Ost-Achse sollten die Reisezeiten zwischen den grossen Zentren mittels einer unterirdischen Magnetschwebbahn massiv verkürzt werden. Das Projekt «Swissmetro» wurde jedoch nach umfangreichen Planungsarbeiten nicht weiterverfolgt. Heute ist der Untergrund im Schweizer Mittelland wieder im Fokus für grosse Infrastrukturprojekte. Prognosen gehen davon aus, dass der Güterverkehr bis 2030 bis zu 45% gegenüber dem Aufkommen von 2010 wachsen könnte. Diese zunehmenden Verkehrsströme an der Oberfläche zwingen Planer und Verursacher dazu, neue Ansätze zur Problemlösung zu suchen. Unter dem Namen Cargo sous terrain soll ab 2030 eine unterirdische, vollautomatische Güterbahn die Logistik- und Ballungszentren im Schweizer Mittelland verbinden. Mit der Realisierung von Cargo sous terrain würde ein grosser Teil des zukünftigen Wachstums im Güterverkehr unter der Erdoberfläche aufgefangen und damit die bereits heute teilweise überlasteten Verkehrswege vom Schwerverkehr entlastet werden ([www.cargosousterrain.ch](http://www.cargosousterrain.ch)).

Das Potenzial für Infrastrukturbauten wurde in GeoMol nicht bearbeitet. Die Resultate von GeoMol sind aber eine Grundlage für das Projekt Cargo sous terrain.

#### GeoMol in der Praxis

*Johannes Graf, Vize-Direktor Strategie und Entwicklung, CSD Ingenieure AG, 8021 Zürich*

«Cargo sous terrain ist eine neue Art der Güter-Infrastruktur im Untergrund und soll bis in gut zehn Jahren das schweizerische Strassen- und Schienennetz ergänzen und an kritischen Punkten entlasten. Es ist ein nachhaltiges, automatisiertes Gesamtlogistiksystem, welches einen flexiblen, unterirdischen Transport von Paletten, Behältern und Paketen erlaubt. Tunnels verbinden Produktions- und Logistikstandorte mit Ballungsräumen. Eine erste Teilstrecke im zentralen Schweizer Mittelland soll ab 2030 den Raum Härkingen/Niederbipp mit der Zürcher City verbinden. Später ist ein Gesamtnetz zwischen Boden- und Genfersee mit Ablegern nach Basel und Luzern geplant.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu Cargo sous terrain galt es, eine Anzahl vorgegebener logistikintensiver

<sup>7</sup> <http://www.nagra.ch/de/wirtgesteine.htm>; Zugriff am 23.03.2017

oberirdischer Zugangspunkte so miteinander zu verbinden, dass die Strecke kurz und gleichzeitig möglichst wenig durch grundwasserführendes Lockergestein des Mittellandes führt. Länge und bautechnische Herausforderungen sind die wesentlichen Faktoren für die Kosten der unterirdischen Bauwerke, welche insgesamt rund 75% der Gesamtinvestition für Cargo sous terrain ausmachen. Deshalb war eine zuverlässige Prognose der geologischen Verhältnisse in der Tiefe wichtig.

Für die Festlegung der Streckenführung und deren Optimierung in der Horizontalen und in der Vertikalen setzten wir GeoMol ein. So konnten wir innert kurzer Zeit mehrere Varianten in einem geologischen 3D-Modell prüfen und deren Auswirkungen auf die Gestehungskosten ermitteln. In enger Zusammenarbeit zwischen dem Geologen und dem Tunnelbauingenieur wurde die Trassierung festgelegt. Durch die Wahl der Tiefenlage konnte der maschinelle Vortrieb geplant und so optimiert werden, dass möglichst wenig Stand-

zeiten für den Umbau der Tunnelbohrmaschinen erforderlich sind und die Anzahl Maschinentypen geringgehalten werden kann. Diese Faktoren führen insgesamt zu einer kürzeren Bauzeit und somit zu einer rascheren Inbetriebnahme. Sämtliche Optimierungen resultierten in einer geringfügig längeren Tunnelstrecke gegenüber den Direktverbindungen, welche auf beinahe 85% im Fels geführt werden kann.

Aus Sicht der Gesamtleitung der Machbarkeitsstudie erwies sich GeoMol als sehr hilfreicher Datensatz für die geologische und tunnelbauerische Optimierung der Linieneinführung in einem 3D-Modell des Untergrunds. Die Genauigkeit erwies sich dabei in der frühen Projektphase als ausreichend, ging es doch primär um die Unterscheidung zwischen Fest- und Lockergestein sowie der Berücksichtigung der Grundwasserspiegel. Dies erlaubte die finanziellen Auswirkungen der Varianten miteinander zu vergleichen und gegenüber der Trägerschaft klare Empfehlungen für die Bestvariante abzugeben.»

## 9. Zugang zu den Ergebnissen

Alle Projektergebnisse sind über verschiedene Kanäle online verfügbar:

- 3D-Datenviewer: browserbasierte Visualisierung und interaktive Analyse der beiden 3D-Modelle GeoMol15 und GeoMol17 (ab Ende 2018).
- map.geologieportal.ch: browserbasierte 2D-Visualisierung der Projektergebnisse (z.B. Mächtigkeitkarten, Höhenmodelle, Geschwindigkeitkarten), mit der Möglichkeit der interaktiven Analyse mit über 500 anderen Themen.
- Geologie-Portal: Zugang zum vorliegenden Bericht.
- Web Map Services: Möglichkeit der Einbindung der 2D-Visualisierung der Projektergebnisse in Desktop-GIS und Web-Anwendungen Dritter, sofern verfügbar.
- Webseite des GeoMol-EU-Projekts: Zugang zu den Schlussberichten des GeoMol-EU-Projekts und der Pilotregionen.

### 9.1 3D-Datenviewer

Für die Publikation von 3D-Modellen über das Internet setzt swisstopo das Software-Framework GST («Geosciences in Space and Time») ein. Dies ermöglicht eine browser-unabhängige Visualisierung und Analyse von 3D-Modellen ohne Verwendung von spezifischen Plug-ins. GST basiert auf einer 3D-Datenbankhaltung der verwendeten Geodaten, verwendet OGC-Standards und unterstützt verschiedene relationale Datenbankmanagement-Systeme (z.B. Postgres, Oracle, MS SQL). Technische und funktionale Grundlagen zu GST finden sich z.B. in GABRIEL et al. (2011), LE et al. (2013) und GEOMOL TEAM (2015).

Der 3D-Viewer für geologische 3D-Modelle von swisstopo ist unter <https://viewer.geomol.ch> mehrsprachig abrufbar. Die Anzeige der Objekte erfolgt direkt aus der 3D-Datenbank, was dynamische, nicht im Voraus berechnete Abfragen und Analysen ermöglicht. Die Daten aus GeoMol15 sind bereits verfügbar, diejenigen von GeoMol17 folgen ab Ende 2018.

#### 9.1.1 3D-Ansicht des 3D-Datenviewers

Die 3D-Ansicht entspricht dem Standardzugang zu den 3D-Modellen (GeoMol15 und GeoMol17). Damit erhalten die Nutzer einen ersten Überblick über die verfügbaren 3D-Modelle. Die ausgewählte Sprache wird standardmässig der eingestellten Sprache des Browsers angepasst, kann aber mit der Sprachauswahl am oberen Rand des Browserfensters geändert werden.

Der generelle Aufbau der 3D-Ansicht des 3D-Datenviewers besteht aus der 3D-Szene (A in Fig. 9-1), dem Navigationsbaum (B in Fig. 9-1), der Menüleiste (C in Fig. 9-1) und der Sprachauswahl (D in Fig. 9-1).

- A) Im 3D-Fenster sind die ausgewählten Objekte in ihrer räumlichen Orientierung sichtbar, welche mit der Maus gesteuert werden kann.
- B) Der Navigationsbaum am linken Rand des Browserfensters ermöglicht das An- und Abwählen von einzelnen Gruppen und Objekten (z.B. Horizonte, Störungszonen). Durch Doppelklick auf die Koordinatenanzeige unterhalb des Navigationsbaums können nutzerspezifische Koordinaten von zum Beispiel Ortschaften oder Gebäuden angegeben werden, zu welchen gezoomt werden soll.
- C) Die Menüleiste verfügt über zwei Reiter mit je kontextabhängigen Auswahlmöglichkeiten für Hilfsmittel zur Unterstützung der Visualisierung.
- D) Sprachauswahl zwischen Deutsch, Französisch und Englisch.

Die Menüleiste des Reiters «3D-Geologie» (C in Fig. 9-1) bietet verschiedene Einstellmöglichkeiten und Hilfsmittel an, mit denen die Visualisierung der Objekte in der 3D-Szene unterstützt werden kann (von links nach rechts):

- Ansichten: Wechseln zwischen verschiedenen voreingestellten Ansichten, mit der Möglichkeit, eine eigene Ansicht zu speichern.
- Überhöhung: Ändern der Überhöhung zwecks besserer Visualisierung von Objekten mit wenig Relief.
- Dynamischer 3D-Schnitt (Slider): Interaktive Möglichkeit, in X-, Y- und Z-Richtung durch das Modell hindurch zu schneiden (s. a. Kap. 9.1.2.2 für Profile).
- Hintergrundfarbe: Ändern der Anzeigefarbe des Hintergrundes.
- Web Map Services (WMS): Anzeige bzw. Einbinden von vordefinierten oder eigenen WMS zur Kombination der 3D-Modelle mit zusätzlichen Informationen.
- Wechseln der Objektdarstellung: Wechseln der Darstellung der Objekte als Oberflächen oder Punktwolken.
- Informationen: Anzeige von allgemeinen Information zum 3D-Viewer und Download der Nutzeranleitung.
- Ansicht als Link teilen (Permalink): Die Kameraposition jeder beliebigen Position kann als Link an Dritte verschickt oder gespeichert werden.
- Vollbildansicht: Wechseln zu Vollbildansicht oder normalen Bildschirmansicht.

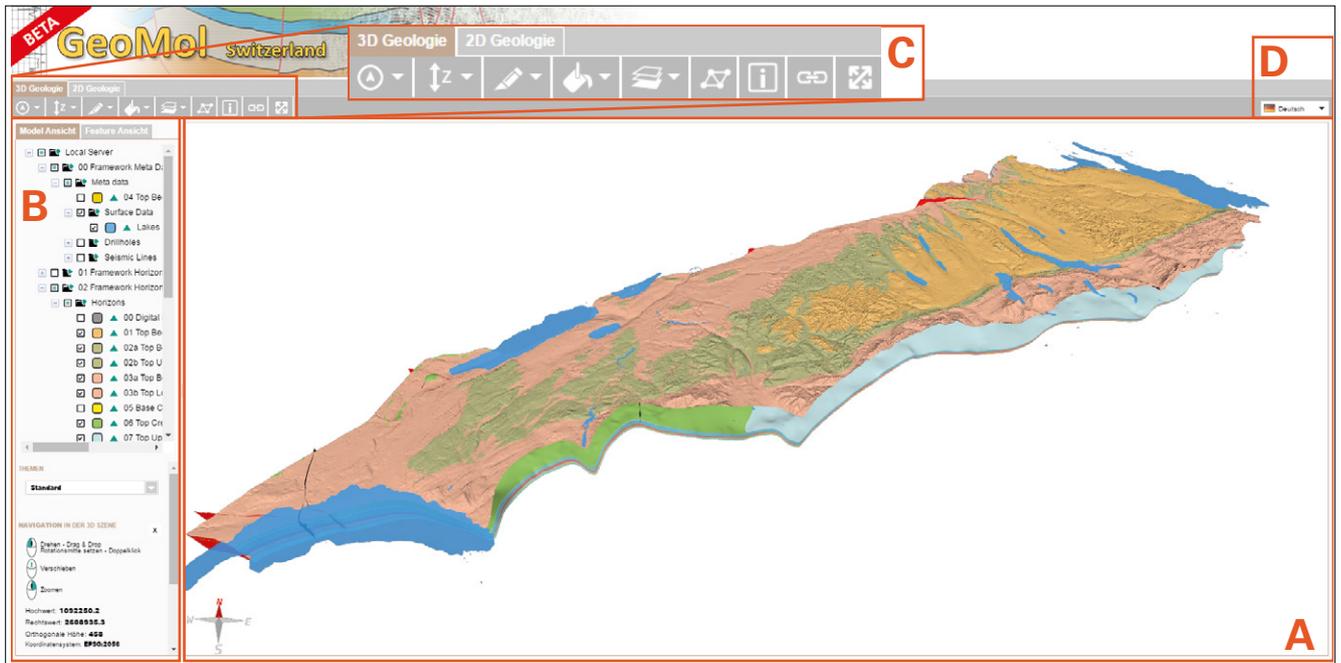


Fig. 9-1: Der Aufbau des 3D-Datenviewers (<https://viewer.geomol.ch>) besteht aus der 3D-Szene (A), dem Navigationsbaum (B), der Menüleiste (C) und der Sprachauswahl (D).

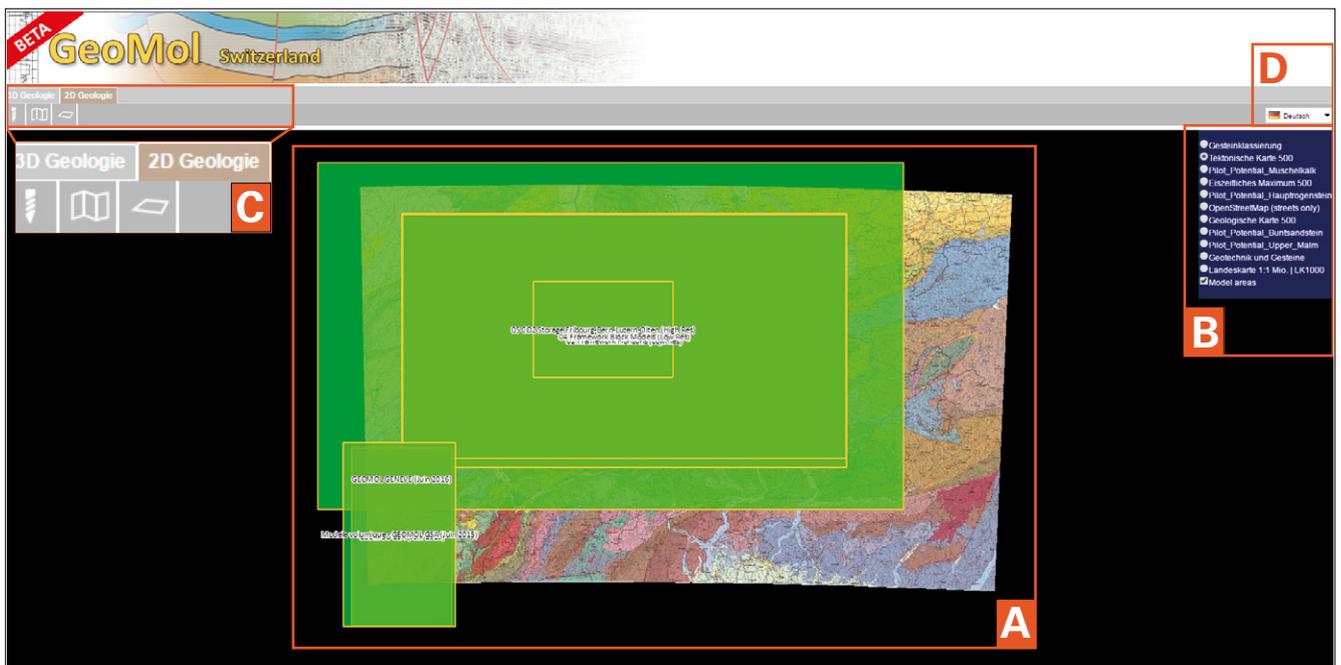


Fig. 9-2: Ansicht des Reiters «2D-Geologie». Vor dem Hintergrund einer auswählbaren Karte werden die Modellperimeter der verfügbaren 3D-Modelle (grüne Flächen) angezeigt.

### 9.1.2 2D-Ansicht des 3D-Viewers

In der 2D-Ansicht kann für eine detaillierte Abfrage der Modelle mit virtuellen Bohrungen, Profil- und Horizontalschnitten genutzt werden. Sie ist ähnlich wie die 3D-Ansicht aufgebaut: Kartenfenster (A in Fig. 9-2), Auswahlmöglichkeit für Hintergrundkarten (B in Fig. 9-2), der Menüleiste (C in Fig. 9-2) und der Sprachauswahl (D in Fig. 9-2).

- A) Im Kartenfenster werden die ausgewählten Hintergrundkarten angezeigt.
- B) Verschiedene vordefinierte WMS können ausgewählt werden, die Ausdehnung der verfügbaren 3D-Modelle (grüne Flächen) kann angezeigt werden.
- C) Die Menüleiste bietet die Auswahlmöglichkeiten zur Erstellung von Bohrungen, Profilen oder Tiefenkarten. Die Schnitte werden direkt aus der 3D-Datenbank heraus erstellt und sind nicht im Voraus berechnet.
- D) Sprachauswahl zwischen Deutsch, Französisch und Englisch.

Für die Erstellung von Schnitten stehen in der Nutzeranleitung detaillierte Erklärungen bereit (Kap. 9.1).

#### 9.1.2.1 Virtuelle Bohrungen

Virtuelle Bohrprofile können entweder für vertikale oder geneigte Bohrungen erstellt werden. Für letztere müssen zusätzliche Angaben gemacht werden. Die Ansatzpunkte können per Mausklick direkt in die Karte gezeichnet oder deren Koordinaten manuell in das Eingabefenster eingetragen werden. Optional kann ein Titel (erscheint auf dem Bohrprofil), ein Massstab, ein Dateiformat und die Auflösung angegeben werden. Mit der Auswahl «gewählte Modelle» können die zu analysierenden Objekte eines oder mehrerer 3D-Modelle detailliert festgelegt werden. Mit «Erstellen» startet die Erstellung des virtuellen Bohrprofils. Die Berechnungszeit hängt von der Art (Flächen vs. Volumen) und Anzahl der gewählten Objekte sowie der allfälligen Angabe eines Massstabes ab. Das Bohrprofil kann anschliessend in einem separaten Browserfenster geöffnet und heruntergeladen werden.

#### 9.1.2.2 Profile

Für die Erstellung eines vertikalen Profilschnittes müssen mindestens zwei Punkte (Start u. Ende) angegeben werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, Schnitte entlang von geknickten Profilsuren berechnen zu lassen. Dafür müssen mindestens drei Punkte angegeben werden. Analog zu den Bohrungen können die Punkte per Maus direkt in der Karte gezeichnet oder manuell in das Eingabefenster eingegeben werden. Mit den restlichen Eingabemöglichkeiten verhält es sich ebenfalls analog zu den virtuellen Bohrungen, ebenso mit der Anzeige und dem Herunterladen des Profilbildes.

#### 9.1.2.3 Tiefenkarten

Die Erstellung von horizontalen Tiefenkarten ist ein Spezialfall der Profilerstellung. Entlang einer Linie (maximal 2 Punkte) kann mit der Angabe einer frei definierbaren Breite der zu analysierende Bereich relativ zur Profilsur

festgelegt werden. Zusätzlich muss die Tiefe angegeben werden, in der die Karte erstellt werden soll. Die Definition der Punkte und die Handhabung der optionalen Eingabemöglichkeiten sowie die Anzeige und das Herunterladen der Karte geschehen analog zu den beiden anderen Möglichkeiten zur Erstellung von Schnitten.

## 9.2 map.geologieportal.ch

Geologische Daten sind unter [map.geologieportal.ch](http://map.geologieportal.ch) verfügbar. Dieser Datenviewer bieten neben über 500 verschiedenen thematisch gruppierten Geodatenätzen auch die Möglichkeit, die Daten in einer 3D-Ansicht (A in Fig. 9-3) anzeigen zu lassen.

Das Thema «Geologie» (B in Fig. 9-3) umfasst ca. 80 verschiedene Datensätze und deckt damit vom Geologischen Atlas der Schweiz 1:25000 über die Geophysik und Geotechnik bis zu Naturgefahren viele erdwissenschaftliche Themen ab. Einzelne Datensätze können direkt und kostenlos heruntergeladen werden, andere sind im swisstopo-Onlineshop verfügbar. Jeder Layer ist mit Metadaten beschrieben, welche in der jeweiligen Infobox (C in Fig. 9-3) angezeigt werden.

Die einzelnen Horizonte und die Störungen von GeoMol17 sind ab Ende 2018 als 2D-Isophysenkarten über diesen Datenviewer zu beziehen.

## 9.3 Geologie-Portal

Das Geologie-Portal ([www.geologieportal.ch](http://www.geologieportal.ch)) ist die Informationsplattform rund um die Geologie der Schweiz. Über diese Webseite sind viele wichtige und nützliche thematische Informationen zu den Grundlagen der Geologie, mineralischen Rohstoffen, Wasser, Energie, geologischen Gefahren, Geologie im Alltag usw. verfügbar. Der Bereich «Daten» bietet Zugang zu geologischen Daten (Datenviewer, 3D-Modelle usw.) und im Bereich «Wissen» werden Zugänge zu Datenmodellen, Lexika, Normen usw. angeboten.

Der vorliegende Bericht kann inklusive Beilagen über das Geologie-Portal ([> Daten > 3D-Modelle](#)) heruntergeladen werden.

## 9.4 Web Map Service

GeoMol15 und GeoMol17 werden schrittweise als Web Map Service (WMS) kostenlos in 2D zur Verfügung gestellt. WMS ist ein standardisiertes Protokoll zur Übertragung von Kartendaten via Internet. Die GeoMol CH WMS entsprechen den Standards nach OGC (Open Geospatial Consortium). Sie werden im Rahmen der swisstopo Geodienste angeboten und können schnell und einfach in Desktop-GIS oder externe Webanwendungen eingebunden werden.

Die Daten sind im Referenzsystem EPSG 2056 (CH1903+/LV95) verfügbar und die Beschreibung der Metadaten richtet sich nach den Vorgaben des Geodatenkatalogs



geocat (www.geocat.ch). Einzelne Layer aus GeoMol15 (Fig. 9-4) sind bereits als WMS verfügbar (<http://swisstopo.geops.ch/geoserver/geomol/wms>).

## 9.5 Webseite des GeoMol-EU-Projekts

Die Webseite [www.geomol.eu](http://www.geomol.eu) bietet Zugang zu allen Resultaten, welche ihm Rahmen des GeoMol-EU-Projekts erarbeitet wurden.

- Reiter «Report»: Download der Schlussberichte sowohl des Gesamtprojekts als auch der einzelnen Pilotregionen.
- Reiter «Mapviewer»: Überblick über thematische Karten, welche in den einzelnen Pilotregionen erstellt wurden, inklusiv Möglichkeit zur Analyse, Download und Druck. Diese Karten können analysiert, heruntergeladen und gedruckt werden. Über den «SearchCatalogue» können die Metadaten der einzelnen Karten abgefragt werden.
- Reiter «3D-Explorer»: Zugang zu den in den Pilotregionen erstellten 3D-Modelle, inklusiv Möglichkeit zur Analyse.

Detaillierte Informationen zum Inhalt dieser Webseite finden sich in GEOMOL TEAM (2015).

## 9.6 Beilagen zum Textband

### 9.6.1 Tafeln

Diesem Textband sind drei Tafeln beigelegt. Tafel I und Tafel II zeigen je zwölf Profilschnitte, welche in regelmässigem Abstand aus GeoMol17 generiert wurden. Diese Profile wurden geologisch und kartographisch überarbeitet.

Auf der Tafel III sind drei Störungskarten auf der Höhe der Horizonte Felsoberfläche, Basis «Känozoikum» und Top Dogger dargestellt.

### 9.6.2 Datenträger

Der diesem Bericht beiliegende Datenträger enthält die Datenzusammenstellungen der verwendeten seismischen Sektionen und Tiefbohrungen. Zusätzlich sind darauf die in Tabelle 9-1 aufgelisteten Karten als PDF-Dateien gespeichert.

Tab.9-1: Übersicht über die auf dem beiliegenden Datenträger verfügbaren Kartendaten.

Titel	Inhalt
Datenübersichtskarten	Beschreibung der Art der Grundlagedaten und deren räumlicher Lage pro modellierten Horizont
Höhenmodelle	Höhenlage und Ausdehnung der einzelnen modellierten Horizonte
Mächtigkeitskarten	Mächtigkeit der einzelnen Einheiten zwischen den modellierten Horizonten
Geschwindigkeitskarten	Intervallgeschwindigkeiten der einzelnen Einheiten zwischen den modellierten Horizonten

## 10. Ausblick

Mit GeoMol15 und insbesondere GeoMol17 liegt zum ersten Mal eine detaillierte und hochauflösende 3D-Visualisierung des Untergrunds des Schweizer Molassebeckens vor. Die im Rahmen von GeoMol erarbeiteten fachlichen und technischen Grundlagen können weiterverwendet werden: Erweiterung und Pflege der bestehenden Modelle, Erarbeitung weiterer Modelle und Ableitung neuer Produkte.

Um den Erfolg von GeoMol längerfristig zu sichern, müssen die Modelle gepflegt werden. Das heisst, dass heute bereits vorhandene, aber noch nicht genutzte Daten umgehend in GeoMol17 integriert werden müssen. Neue, noch nicht vorhandene Daten sind, sobald verfügbar, auf regelmässiger Basis in GeoMol17 einzuarbeiten.

Sowohl GeoMol15 als auch GeoMol17 bilden die Grundlage für thematische Erweiterungen. Der Ausbau beider Modelle mit wichtigen Gesteinsparametern (z.B. Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Porosität, Permeabilität) erlaubt die Erarbeitung einer grossen Zahl an neuen, noch nicht bestehenden Modellen. Beispielsweise besteht zurzeit noch kein öffentlich zugängliches Temperaturmodell für das Schweizer Mittelland. Weiter liegen für die Beschreibung des tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzials in der Schweiz noch nicht genügend 3D-Grundlagedaten vor. Zusätzlich kann die Modellierung des Spannungsfelds mit GeoMol17 auf Basis neuer Grundlagen weitergeführt werden.

Die Kombination der Resultate aus GeoMol mit weiteren Projekten der Landesgeologie erweitert die gegenseitigen Einsatzmöglichkeiten. Zusammen mit dem Projekt «GeoQuat - Informationssystem Quartäre Lockergesteine der Schweiz» wird es möglich sein, den untiefen und tiefen Untergrund und deren unterschiedliche Eigenschaften (vor-

erst nur regional) komplett darzustellen und für Analysen verwenden zu können. Das Projekt «GeoTherm» stellt Grundlagedaten zur Tiefengeothermie in der Schweiz öffentlich zugänglich bereit. Damit kann ein wichtiger Beitrag zum Gelingen der Energiestrategie 2050 geleistet werden.

Aus beiden GeoMol-Resultaten kann eine Vielzahl von neuen Produkten abgeleitet werden. Analysewerkzeuge erlauben die Herstellung von individuell konfigurierbaren Profilen oder virtuellen Bohrungen. Sofern zukünftig Volumenmodelle vorhanden sind, können auf deren Basis verschiedene parametrisierte Blockmodelle (Voxelmodelle) hergestellt werden.

Mit dem Produkt GST («Geosciences in Space and Time») kann die Landesgeologie alle ihre 3D-Modelle harmonisiert, strukturiert und blattschnittfrei in einer Datenbank halten und direkt via Internetzugriff zugänglich machen (s. a. Kap. 9). Die Landesgeologie nutzt diese Software aber auch für die interne Zusammenarbeit, wenn mehrere Personen gemeinsam an denselben Daten arbeiten. Als erste Konsequenz aus GeoMol hat der Ausbau der Funktionalität in Richtung Speicherung von Voxelmodellen bereits begonnen.

GeoMol17 bildet eine der zentralen Grundlagen für das Nationale Geologische Modell. Damit können zukünftig die Produkte und Daten der Landesgeologie und ihrer Partner im georeferenzierten Raum visualisiert werden. Ziel ist weniger die Erstellung und Publikation von Einzelmodellen aus dem tiefen oder untiefen Untergrund. Vielmehr wird die integrale, dreidimensionale Sichtweise des Untergrunds Standard sein, der auf Basis von harmonisierten Grundlagen visualisiert und analysiert werden kann.

## 11. Schlusswort

Das Bevölkerungs- und Wirtschaftsvolumen der Schweiz, insbesondere im Mittelland, wächst stetig. Damit eng verbunden, sind Infrastrukturausbauten (Verkehr, Energie, Kommunikation), Ressourcennutzungen (Wasser, Rohstoffe, Energie) und Fragen der Entsorgung und Lagerung von Abfällen. Das Schweizer Mittelland ist somit für Politik, Gesellschaft, Technik und Wissenschaft von grossem Interesse. Entwicklungen und Herausforderungen in den oben genannten Bereichen fokussieren sich vermehrt auf diese Region.

Mit der zunehmenden Platzknappheit an der Erdoberfläche nimmt die Bedeutung des Untergrunds und seiner Nutzungsmöglichkeiten stark zu. Das bedeutet: Keine Raumplanung ohne Einbezug des Untergrunds. Um eine optimale Planung sicher zu stellen, müssen geologische Grundlagedaten zum Untergrund vorhanden sein.

Die Resultate von GeoMol ermöglichen es, erstmals harmonisierte geologische 3D-Modelle des Molassebeckens öffentlich zugänglich zu machen. GeoMol15 ist kostenlos verfügbar und bietet so die Grundlage für eine breite Nutzung.

Die beiden Modelle GeoMol15 u. GeoMol17 wurden aus Grundlagedaten (v. a. Bohrungen u. Seismik) im Wert von mehreren CHF 100 Mio. erstellt. Ein Wert, der den Partnern und Kunden der Landesgeologie zugutekommt. Sie profitieren von der Möglichkeit, Modelle online analysieren oder in eigenen Projekten weiterzuverwenden. Untersuchungen zum volkswirtschaftlichen Nutzen von geologischen Karten zeigen, dass dieser ca. dem 6- bis 8-fachen der verwendeten Grundlagedaten entsprechen (SPINATSCH 2011). Somit leistet GeoMol einen wichtigen Beitrag zur Steigerung des volkswirtschaftlichen Nutzens von Geodaten in der Schweiz.

Der Geodatenmarkt in der Schweiz wird sich künftig nicht mehr über die Erstellung von neuen Produkten weiterentwickeln, sondern über die Aufarbeitung von bestehen-

den Daten in neuen Zusammenhängen (FRICK et al. 2016). Auch in diesem Bereich leistet GeoMol einen wichtigen Beitrag, da aus diesen Modellen eine Vielzahl neuer standardisierter oder individueller Produkte abgeleitet werden kann.

Nichts verdeutlicht den Wahrnehmungswandel von geologischen 3D-Modellen so gut wie der Einsatz von GeoMol15 in den Planungsarbeiten von Cargo sous terrain. Vor wenigen Jahren noch unvorstellbar, stellen geologische 3D-Modelle heute einen integrierten Grundlagedatensatz in Planungsarbeiten für ein solch innovatives Projekt dar. Das Aufkommen von BIM («Building Information Modeling») als Grundlage zum vernetzten Arbeiten im Bauwesen wird diesen Trend weiter verstärken.

Mit dem Vorliegen von GeoMol15 und GeoMol17 ist der erste Schritt zur Dokumentation des Untergrunds der Schweiz mit geologischen 3D-Modellen getan. Um die landesweite und harmonisierte Abdeckung mit solchen Modellen zu erreichen, braucht es nun weitere Schritte. Insbesondere müssen bestehende Modelle gepflegt und regelmässig mit neuen Daten ergänzt werden. Im Fokus steht auch der thematische Ausbau der bestehenden 3D-Modelle, die beispielsweise mit Gesteinsparametern ergänzt werden, um damit Grundlagen für weitere Fragestellungen zu liefern. Letztlich ist es notwendig, die Modelle geographisch zu erweitern, um neben dem Mittelland auch die anderen Regionen der Schweiz abdecken zu können. Diese Entwicklungen brauchen Zeit und Geld.

Es sind Investitionen, die sich lohnen, denn so lassen sich die Voraussetzungen schaffen, den geologischen 3D-Modellen einen festen Platz in der Entscheidungsfindung, Planung und Realisierung von Projekten in Politik, Gesellschaft, Technik und Wissenschaft zu sichern.

## 12. Danksagung

Ein Projekt in der Grössenordnung von GeoMol kann nur mit der Unterstützung einer Vielzahl von Firmen, Ämtern, Forschungseinrichtungen, Spezialisten und Mitarbeit der Projektbearbeiter umgesetzt werden.

Ohne die finanzielle Unterstützung des Bundesamts für Landestopografie swisstopo, des Bundesamts für Energie BFE, des Bundesamts für Umwelt BAFU und des Bundesamts für Raumentwicklung ARE sowie der Kantone Aargau, Fribourg, Genf, Luzern, Solothurn, Waadt und Zürich hätte GeoMol nicht durchgeführt werden können.

Für das Bereitstellen von umfangreichen Daten (Seismik und Tiefbohrungen) sind wir der SEAG AG für Schweizerisches Erdöl und der Nagra zu grossem Dank verpflichtet. Auch die Kantone Aargau, Appenzell Ausserrhoden, Appenzell Innerrhoden, Bern, Freiburg, Genf, Glarus, Graubünden, Luzern, Neuenburg, Nidwalden, Obwalden, Schaffhausen, Schwyz, Solothurn, St. Gallen, Tessin, Thurgau, Uri, Waadt, Wallis, Zug und Zürich haben wesentlich dazu beigetragen, einen möglichst grossen Datensatz als Fundament für das Projekt zur Verfügung zu stellen. Ferner haben uns die St. Galler Stadtwerke, die SBB, die Swissgas, das Bundesamt für Strassen ASTRA, die ETH Zürich, die EAWAG, Geo-Energie Suisse, Grob Gemüse Schlattingen, ExxonMobil, das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) und das Bureau de recherche géologique et minière (BRGM, Frankreich) Zugang zu Ihren Daten gewährt.

Es sind die Menschen und ihr Wissen, die aus einer gewaltigen Menge an unterschiedlichen Daten zwei kohärente Modelle produzierten. Mehrere externe Spezialisten haben das Projekt begleitet und ihr Wissen grosszügig an die entstehende Gruppe von Spezialisten bei der Landesgeologie weitervermittelt. Besonders erwähnt seien hier: Patrick Lahusen (SEAG), Philip Birkhäuser, Michael Schnellmann und Herfried Madritsch (alle Nagra), Werner Leu (Geoform), Armelle Kloppenburg (4DGeo), Gianreto Manatschal (Universität Strassburg), Philippe Roth (Schweizerischer Erdbebendienst), Andreas Hölker (Geophytec), Heinrich Schwendener (†, Swissgas), Olivier Zingg (Geo-Energie Suisse) und Thomas Bloch (St. Galler Stadtwerke).

Die Projektsteuerung bestand aus Olivier Lateltin (swisstopo), Gunter Siddiqi (BFE), Bernard Loup (BAFU), Nathalie Andenmatten (Kt. GE), Patrick Lahusen (SEAG), Werner Leu (Geoform), Nils Oesterling (swisstopo) und Urs Marti (swisstopo). Ihnen gebührt Dank für ihre Unterstützung und die strategische Projektsteuerung.

Die Projektarbeiten wurden zweimal jährlich von einer externen Reviewgruppe geprüft: Philip Birkhäuser, Michael Schnellmann und Herfried Madritsch (alle Nagra), Armelle Kloppenburg (4DGeo), Gianreto Manatschal (G-Geo Mar-

gins-M). Wir danken diesen Personen für ihre kritische Begleitung, die fachliche Steuerung des Projekts und die Prüfung des technischen Inhalts.

Die Projektpartner haben sich im Rahmen der Begleitgruppe regelmässig getroffen, um den Stand des Projekts vorzustellen und über die Zwischenresultate zu diskutieren. An dieser Stelle möchten wir den Mitgliedern der Begleitgruppe für Ihr Interesse am Projekt danken. Es sind dies: Hans Burger, Andreas Märki und Daniel Schaub (alle Kt. AG), Marco Schwab (Kt. FR), Nathalie Andenmatten und Michel Meyer (beide Kt. GE), Felix Renner (Kt. LU), Martin Brehmer und Yvonne Kaufmann (beide Kt. SO), David Giorgis (Kt. VD), Werner Blüm und Kurt Nyffenegger (beide Kt. ZH).

GeoMol17 wurde in Zusammenarbeit mit 5 Partnerinstitutionen erstellt. Für die Zusammenarbeit, die zahlreichen Diskussionen und den regen Erfahrungsaustausch bezüglich Daten, Arbeitsabläufen und Softwarepaketen gilt unser Dank folgenden Kollegen und Kolleginnen: Nicolas Clerc (Universität Genf), Robin Marchant (Geologisches Museum Kanton Waadt), Marius Gruber, Jon Mosar und Anna Sommaruga (alle Universität Freiburg), Samuel Mock (Universität Bern), Birte Anders, Horst Dresmann und Peter Huggenberger (alle Universität Basel).

Wir danken auch unseren Kollegen aus dem benachbarten Ausland, mit denen wir im GeoMol-EU-Projekt zusammengearbeitet haben.

Unseren Kolleginnen und Kollegen in der Landesgeologie danken wir für angeregte Diskussionen und fachliche Unterstützung. Im Besonderen geht dieser Dank an Reto Burkhalter, Yves Gouffon, Daniel Kälin, Oliver Kempf, Alain Morard und Stefan Strasky. Für kritische Anregungen und stilistische Verfeinerungen des Textes wird Reto Burkhalter verdankt.

Für die Übersetzung des Berichts ins Französische war Christian Marro besorgt. Die Übersetzungen des Vorworts und der Zusammenfassung ins Italienische und Englische erfolgte durch Alessia Vandelli und Lance Reynolds. Den Schriftsatz gestaltete Renato Howald.

Zusätzlich zu den Autoren vervollständigten Bastien Delacou, Gennaro Di Tommaso, Mirjam Dürst Stucki, Pascal Kuhn, Melina Manzini, Angelo Milani, Maria Ponzio, Philip Wehrens und Valentin Zuchuat zeitweise das GeoMol-Team bei swisstopo. Sie alle haben massgeblich zum Gelingen des Projekts beigetragen. Ohne ihr Engagement und ihre Überzeugung vom Projekt, wäre es unmöglich gewesen, GeoMol zu realisieren.

Wir danken allen Beteiligten für ihre geleistete Arbeit, für ihre Beiträge und für die Weitergabe von Informationen.

## Literaturverzeichnis

- ABDEFETTAH, Y., SCHILL, E. & KUHN, P. (2014): Characterization of geothermally relevant structures at the top of crystalline basement in Switzerland by filters and gravity forward modelling. – *Geophys. J. int.* 199, 226–241.
- ABEDNEGO, M. (2015): Microseismic tomography analysis of the lager Fribourg area (western Swiss Molasse Basin). – PhD Thesis Univ. Fribourg.
- ALLENBACH, R. (2001): Synsedimentary tectonics in an epicontinental sea: A new interpretation of the Oxfordian basins of northern Switzerland. – *Ecol. geol. Helv.* 94, 265–287.
- (2002): The ups and downs of «Tectonic Quiescence» – recognizing differential subsidence in the epicontinental sea of the Oxfordian in the Swiss Jura Mountains. – *Sediment. Geol.* 150, 323–342.
- BACHMANN, G.H., DOHR, G. & MÜLLER, M. (1982): Exploration in a classic thrust belt and its foreland: Bavarian Alps, Germany. – *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 66, 2529–2542.
- BACHMANN, G.H. & KOCH, K. (1983): Alpine front and Molasse Basin, Bavaria. In: BALLY, A.W. (Ed.): *Seismic Expression of Structural Styles* (p. 21–32). – *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 15/3.
- BACHMANN, G.H. & MÜLLER, M. (1983): Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. – *Ecol. geol. Helv.* 85, 519–530.
- BACHMANN, G.H., MÜLLER, M. & WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse basin (Germany, Switzerland). – *Tectonophysics* 137/1–4, 77–92.
- BAER, M., DEICHMANN, N. & BRAUNMILLER, J. (2001): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2000. – *Ecol. geol. Helv.* 94, 253–264.
- BAER, M., DEICHMANN, N., BRAUNMILLER, J., CLINTON, J., HUSEN, S., FÄH, D., GIARDINI, D., KÄSTLI, P., KRADOLFER, U. & WIEMER, S. (2007): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2006. – *Swiss J. Geosci.* 100, 517–528.
- BAER, M., DEICHMANN, N. & FÄH, D. (1997): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 1996. – *Ecol. geol. Helv.* 90, 557–567.
- BAUJARD, C., SIGNORELLI, S. & KOHL, T. (2007): Atlas des ressources géothermiques de la Suisse Occidentale. – *Matér. Géol. Suisse, Géophys.* 40.
- BAUMBERGER, R. (2015): Quantification of lineaments: Link between internal 3D structure and surface evolution of the Hasli valley (Aar massif, Central Alps, Switzerland). – PhD Thesis Univ. Bern.
- BAUMBERGER, R. & ALLENBACH, R. (2016): 3D model of the Swiss Molasse Basin – A first step towards a national geological 3D model. – *Swiss Bull. appl. Geol.* 21/1, 17–28.
- BAUMBERGER, R., ALLENBACH, R. & VOLKEN, S. (2015): From wallflower to eye-catcher: 3d geological modelling in Switzerland – more than XYZ, less than a Swiss Army knife. – *Proc. 3D Modelling Workshop, Geol. Soc. Amer. annu. Conf. 2015, Baltimore.*
- BAUMBERGER, R. & MICHAEL, C.S. (2013): GeoMol questionnaire for stakeholder survey – evaluation for Switzerland (unpubl.).
- BECK, P. (1945): Über den Mechanismus der subalpinen Molassetektonik. – *Ecol. geol. Helv.* 38, 353–368.
- BENZ, C. (2003): Der würmeiszeitliche Rheingletscher-Maximalstand: Digitale Rekonstruktion, Modellierung und Analyse mit einem Geographischen Informationssystem. – Masterarb. Univ. Zürich. (unpubl.).
- BERGER, J.-P., KÄLIN, D. & KEMPF, O. (2010): Swiss Molasse lithostratigraphy. – 8<sup>th</sup> Swiss Geosci. Meet., Abstr. Vol., 127.
- BERGER, J.-P., REICHENBACHER, B., BECKER, D., GRIMM, M., GRIMM, K., PICOT, L., STORNI, A., PIRKENSEER, C., DERER, C. & SCHAEFER, A. (2005a): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 94, 697–710.
- BERGER, J.-P., REICHENBACHER, B., BECKER, D., GRIMM, M., GRIMM, K., PICOT, L., STORNI, A., PIRKENSEER, C. & SCHAEFER, A. (2005b): Eocene–Pliocene time scale and stratigraphy of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB). – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 94, 711–731.
- BERNASCONI, R. (2011): Anpassungsvorschlag Grundwasserkarte St. Gallen – Raum Sargans.
- BERTSCHY, R. (1958): Geologie der Kreide und Molasse in der Umgebung von Grandson (Kt. Waadt). – *Ecol. geol. Helv.* 5/1, 217–263.
- BISTACCHI, A. (2010): Three-dimensional characterization of a crustal-scale fault zone: the Pusteria and Sprechenstein fault system (Eastern Alps). – *J. struct. Geol.* 32, 2022–2041.
- BISTACCHI, A., MASSIRONI, M., DAL PIAZ, G.V., DAL PIAZ, G.D., MONOPOLI, B., SCHIAVO, A. & TOFFOLON, G. (2009): 3D fold and fault reconstruction with an uncertainty model: An example from an Alpine tunnel case study. – *Computers & Geosci.* 34, 351–372.
- BITTERLI-DREHER, P., GRAF, H.R., NAEF, H., DIEBOLD, P., MATOUSEK, F. & BURGER, H. (2007): Blatt 1070 Baden. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 120.
- BLÄSI, H.R., DEPLAZES, G., SCHNELLMANN, M. & TRABER, D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie des «Braunen Doggers» und seiner westlichen Äquivalente. – *Nagra Arbeitsber. NAB* 12-51.
- BLAU, R.V. (1966): Molasse und Flysch im östlichen Gurnigelgebiet (Kt. Bern). – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 125.
- BODMER, P., GUNZENHAUSER, B., ISELI, B.-F. & MANSER, M. (1996): Quartärmächtigkeiten in den Haupttälern der Zentralschweiz. – *Bull. angew. Geol.* 1/1, 37–53.
- BOND, C.E., JOHNSON, G. & ELLIS, J.F. (2015): Structural model creation: the impact of data type and creative space on geological reasoning and interpretation. – *Spec. Publ. geol. Soc. London* 421, 83–97.
- BOND, C.E., SHIPTON, Z.K., JONES, R.R., BUTLER, R.W.H. & GIBBS, A.D. (2007): Knowledge transfer in a digital world: Field data acquisition, uncertainty, visualization, and data management. – *Geosphere* 3/6, 568–576.
- BONNET, C. (2007): Interactions between tectonics and surface processes in the Alpine foreland: Insights from analogue model and analysis of recent faulting. – PhD Thesis Univ. Fribourg, *GeoFocus* 17
- BURGER, H. (2016): Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen. – *Swiss Bull. angew. Geol.* 21/1, 69–90.
- BURKHALTER, R.M. (1996): Die Passwang-Allformation (unteres Aalénien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Schweizer Jura. – *Ecol. geol. Helv.* 89, 875–934.

- BURKHARD, M. (1990): Aspects of the large-scale Miocene deformation in the most external part of the Swiss Alps (Subalpine Molasse to Jura fold belt). – *Eclogae geol. Helv.* 83, 559–583.
- BUSSMANN, F. & ANSELMETTI, F. (2010): Rossberg landslide history and flood chronology as recorded in Lake Lauerz sediments (Central Switzerland). – *Swiss J. Geosci.* 103, 43–59.
- CAPAR, L., COUËFFÉ, R., BRENOT, A., COURRIOUX, G., DEZAYES, C., GABALDA, S., LOPEZ, S., MARC, S., RAMBOURG, D., SIMÉON, Y., ANDENMATTEN, N., CLERC, N., MEYER, M. & RUSILLON, E. (2015): GeoMol – Évaluation des ressources naturelles dans les bassins d'avant-chaine alpins pour une utilisation et une gestion durable du sous-sol; Zone Pilote Genève–Savoie. – Rapp. Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans 64744-FR.
- CAUMON, G., COLLON-DROUAILLET, P., LE CARLIER DE VESLUD, C., VISEUR, S. & SAUSSE, J. (2009): Surface-based 3D modeling of geological structures. – *Math. Geosci.* 41, 927–945.
- CHAROLLAIS, J., PLANCHEREL, R., MONJUVENT, G., DEBELMAS, J., avec la collaboration de DEVILLE, Q., DONZEAU, M., GALLAY, A., GORIN, G., NICOD, G., KINDLER, P., RUCHAT, C., TURREL, C. & WERNLI, R. (1998): Feuille 654 Annemasse. – Carte géol. France 1:50 000, Notice expl. 654, Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans.
- CLERC, N. (2016): GeoMol-CH project: Interpretation and modeling report of the Geneva area. – Univ. Genève (unpubl.).
- COOPERS AND LYBRAND (1996): Economic aspects of the collection, dissemination and integration of government's geospatial information, a report arising from work carried out for Ordnance Survey. – Ordnance Survey, Southampton.
- COWIE, P.A. & SCHOLZ, C.H. (1992): Physical explanation for displacement-length relationship for faults using a post-yield fracture mechanics model. – *J. struct. Geol.* 14, 1133–1148.
- CROSETTO, M., TARANTOLA, S. & SALTELLI, A. (2000): Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. – *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, 71–79.
- DAVIS, T.J. & KELLER, P. (1997): Modelling and visualizing multiple spatial uncertainties. – *Computers & Geosci.* 23/4, 397–408.
- DEICHMANN, N., BAER, M. & BRAUNMILLER (2000): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 1999. – *Eclogae geol. Helv.* 93, 305–406.
- (2004): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2003. – *Eclogae geol. Helv.* 97, 447–458.
- DEPLAZES, G., BLÄSI, H.R., SCHNELLMANN, M. & TRABER, D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten. – Nagra Arbeitsber. NAB 13-16.
- DIAMOND, L., LEU, W. & CHEVALIER, G. (2010): Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Schweiz. – Schlussber. z. H. Bundesamt f. Energie BFE.
- DIEBOLD, P. & NAEF, H. (1991): Der Nordschweizer Permokarbondrog. – Nagra informiert 12/2, 29–36.
- DIEBOLD, P., NAEF, H. & AMMANN, M. (1991): Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz., Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. – Nagra tech. Ber. NTB 90-04.
- DIEBOLD, P. & NOACK, T. (1997): Late Paleozoic troughs and Tertiary structures in the eastern Folded Jura. In: PFIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, S. & STECK, A. (Ed.): Deep structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20 (p. 59–63). – Birkhäuser, Basel.
- DIEHL, T., CLINTON, J., KRAFT, T., HUSEN, S., PLENKERS, K., GUILHELM, A., BEHR, Y., CAUZZI, C., KÄSTLI, P., HASLINGER, F., FÄH, D., MICHEL, C. & WIEMER, S. (2014): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2013. – *Swiss J. Geosci.* 107, 359–375.
- DIEHL, T., DEICHMANN, N., CLINTON, J., KÄSTLI, P., CAUZZI, C., KRAFT, T., BEHR, Y., EDWARDS, B., GUILHEM, A., KORGER, E., HOBIGER, M., HASLINGER, F., FÄH, D. & WIEMER, W. (2015): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2014. – *Swiss J. Geosci.* 107, 425–443.
- DONZEAU, M., WERNLI, R., CHAROLLAIS, J. & MONJUVENT, G. (1997a): Feuille 653 Saint-Julien-en-Genevois. – Carte géol. France 1:50 000, Carte 653, Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans.
- (1997b): Feuille 653 Saint-Julien-en-Genevois. – Carte géol. France 1:50 000, Notice expl. 653, Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans.
- DROZDZWESKI, G. (1979): Grundmuster der Falten und Bruchstrukturen im Ruhrkarbon. – *Z. dtsh. geol. Ges.* 130, 51–67.
- DUPUY, D. (2005): Etude des sédiments Quaternaires, de la Molasse et sa tectonique, dans le Grand Lac (Lac Léman) à partir de données sismiques 2D et 3D. – Thèse Univ. Lausanne.
- DUPUY, D., MARILLIER, F., PLANCHEREL, R. & WEIDMANN, M. (2014): Analyse structurale de la région lémanique basée sur la sismique réflexion dans le Léman (Grand Lac et Haut Lac) et la géologie des rives nord et sud. – Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] 170.
- DÜRST STUCKI, M. & SCHLUNEGGER, F. (2013): Identification of erosional mechanism during past glaciations based on a bedrock surface model of the central European Alps. – *Earth and planet. Sci. Lett.* 384, 57–70.
- EGLI, D., MOSAR, J., IBELE, T. & MADRITSCH, H. (2016): The role of precursory structures on Tertiary deformation in the Black Forest–Hegau region. – *Int. J. Earth. Sci. (Geol. Resch.)*, DOI 10.1007/s00531-016-1427-8.
- ENGLER, R. & SOMMARUGA, A. (2013): User guide to the methodology of the Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. – Univ. Fribourg (unpubl.).
- FÄH, D., GIARDINI, D., KÄSTLI, P., DEICHMANN, N., GISLER, M., SCHWARZ-ZANETTI, G., ALVAREZ-RUBIO, S., SELLAMI, S., EDWARDS, B., ALLMANN, B., BETHMANN, F., WÖSSNER, J., GASSNER-STAMM, G., FRITSCH, S. & EBERHARD, D. (2011): ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland, release 2011. Report and database. Public catalogue, 17.04.2011. – Rep. SED/RISK/R/001/20110417. Swiss seismol. Serv. ETH Zürich.
- FAURE, M. (1995): Late orogenic carboniferous extensions in the Variscan French Massif Central. – *Tectonics* 14/1, 132–153.
- FINCKH, P., KELTS, K. & LAMBERT, A. (1984): Seismic stratigraphy and bedrock forms in perialpine lakes. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 95, 1118–1128.
- FIORE, J. (2007): Quaternary subglacial processes in Switzerland: geomorphology of the Plateau and seismic stratigraphy of western Lake Geneva. – PhD Thesis Univ. Geneva.
- FRANK, S., FREIMOSER, M. & WILDBERGER, A. (2011): Felsisohypsenkarte des Gebietes von Atlasblatt Winterthur (Taf. III). In: WILDBERGER, A., REY, R., FRANK, S. & FREIMOSER, M. (2011): Blatt 1072 Winterthur. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Erläut. 140.
- FRICK, R., STRAHM, M. & NOTTER, B. (2016): Geoinformationsmarkt Schweiz – Marktanalyse und Wirtschaftsmonitoring. Schlussbericht. – Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo, SOGI.
- GABRIEL, P., GIETZEL, J., LE, H.H. & SCHAEUBEN, H. (2011): A network based data store for geoscience data and its implementation. – Proc. 31<sup>st</sup> Gocad Meet., Nancy.
- GEO MOL LCA-PROJEKTTEAM (2015): GeoMol – Geopotenziale für die nachhaltige Nutzung des tieferen Untergrunds in den alpinen Vorlandbecken. Abschlussbericht des Pilotgebiets Bodensee–Allgäu. – LGRB-Informationen 30.
- GEO MOL TEAM (2015): GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources. – Proj. Rep., Bayer. Landesamt f. Umwelt.
- GILLESPIE, P.A., WALSH, J.J. & WATTERSON, J. (1992): Limitations of dimension and displacement data from single faults and the consequences for data analysis and interpretation. – *J. struct. Geol.* 14, 1157–1172.
- GISLER, M. (2011): Erdöl in der Schweiz, eine kleine Kulturgeschichte, Jubiläumspublikation Erdöl-Vereinigung. – Ver. f. wirtschaftshist. Stud., Zürich.

- GORIN, G. (1989): Interprétation géologique de la campagne sismique GG 87 dans le canton de Genève. – Serv. cantonal Géol., Dépt de l'Intérieur et de l'Agriculture (inéd.).
- (1992): Rapport sur l'interprétation de la campagne de sismique réflexion 1990 dans le canton de Genève (périmètre Vernier–One x–Sezegnin–Avully–Vernier). – Serv. industriels Genève (inéd.).
- GORIN, G., MOREND, D. & PUGIN, A. (2003): Bedrock, Quaternary sediments and recent fault activity in central Lake Neuchâtel, as derived from high-resolution reflection seismics. – *Eclogae geol. Helv.* 96, 3–10.
- GORIN, G., SIGNER, C. & AMBERGER, G. (1993): Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data. – *Eclogae geol. Helv.* 86, 693–716.
- GRAF, H.R. (2007): Isohypsenkarte der plio-pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Baden (Taf. II). In: BITTERLI-DREHER, P., GRAF, H.R., NAEF, H., DIEBOLD, P., MATOUSEK, F., BURGER, H. & PAULI-GABI, T. (2007): Blatt 1070 Baden. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 120.
- (2009): Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz. – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 168.
- GRAF, H.R. & WILLENBERG, H. (2011a): Isohypsenkarte der pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Aarau (Taf. III). In: JORDAN, P., GRAF, H.R., EBERHARD, M., JOST, J., KÄLIN, D. & BITTERLI-DREHER, P.H. (2011): Blatt 1089 Aarau. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 135.
- (2011b): Isohypsenkarte der pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Murgenthal (Taf. II). In: BITTERLI, T., JORDI, H.A., GERBER, M.E., GNÄGI, C. & GRAF, H.R. (2011): Blatt 1108 Murgenthal. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 113.
- (2012): Isohypsenkarte des Felsuntergrunds im Gebiet von Atlasblatt Schöftland (Taf. III). In: GRAF, H.R., JOST, J., EBERHARD, M., KRUYSSÉ, H. & KEMPF, O. (2012): Blatt 1109 Schöftland. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 150.
- (2014): Isohypsenkarte der pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Balsthal und Nordteil von Atlasblatt Solothurn 1:50000 (Taf. IV). In: BLÄSI, H.R., GYGI, R., GNÄGI, C., GRAF, H.R., JORDAN, P., LAUBSCHER H.P., HEROLD, T., SCHLANKE, S., BURKHALTER, R. & KÄLIN, D. (2014): Blatt 1107 Balsthal. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 139.
- GREEN, A.G., MERZ, K., MARTI, U. & SPILLMANN, T. (2013): Gravity data in northern Switzerland and southern Germany. – *Nagra Arbeitsber. NAB* 13-40.
- GRUBER, M. (2017): Structural investigations of the western Swiss Molasse Basin – From 2D seismic interpretation to a 3D geological model. – PhD Thesis Univ. Fribourg (in prep).
- GRUBER, M., SOMMARUGA, A., ABEDNEGO, M., VOUILLAMOZ, N. & MOSAR, J. (2013): 3D modeling of the Fribourg area – western Swiss Molasse Basin, Switzerland. – *Alpine Workshop 2013, Schlading.*
- GRUBER, M., SOMMARUGA, A. & MOSAR, J. (2016): Modelling journal of the 3D-geological model for the GeoMol CH project in Canton Fribourg (Switzerland). – Univ. Fribourg (unpubl.).
- GRÜNENFELDER, T. (1989): Gravimetrische Bestimmung der Quartärmächtigkeit am Zusammenfluss von Rhein und Seez. – *ETH Zürich.*
- GUBLER, T. (2009): Blatt 1111 Albis. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Karte 134.
- GUNNINK, J., MALJERS, D. & HUMMELMAN, J. (2010): Quantifying uncertainty of geological 3D layer models, constructed with a-priori geological expertise. In: *Proceedings of the Int. Assoc. math. Geosci. gen. Assembly 2010, IAMG 2010.*
- HABICHT, K. (1945): Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallisch-appenzellischen Molassegebiet. – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 83.
- HABICHT, J.K.A. (1987): Internationales stratigraphisches Lexikon, Bd. I: Europa, Fasz. 7 Schweiz, 7b Schweizerisches Mittelland (Molasse). – *Schweiz. geol. Komm. und Landeshydrol. u. -geol.*
- HAHMANN, S. & BURGHARDT, D. (2013): How much information is geospatially referenced? Networks and cognition. – *Int. J. geogr. Inform. Sci.* 27/6, 1171–1189.
- HANTKE, R., WYSSLING, G. & BOLLINGER, D. (2009): Blatt 1132 Einsiedeln. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Karte 129.
- HARTMANN, H. VON, BELECKE, T., BUNESS, H., MUSMANN, P. & SCHULZ, R. (2015): Seismische Exploration für tiefe Geothermie. – *Geol. Jb. B* 104, Hannover.
- HAUS, H. (1937): Geologie der Gegend von Schangnau im oberen Emmental (Kt. Bern): ein Beitrag zur Stratigraphie und Tektonik der subalpinen Molasse und des Alpenrandes. – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 75.
- HEIDBACH, O. & REINECKER, J. (2013): Analyse des rezenten Spannungsfelds der Nordschweiz. – *Nagra Arbeitsber. NAB* 12-05.
- HEILBRONNER, R. & BARRETT, S. (2014): Image analysis in earth sciences – microstructures and textures of earth materials. – Springer, Heidelberg.
- HENK, A. & TIMMERMAN, M.J. (2005): Europe/Permian Basins. In: SELLEY, R.C., COCKS, L.R. & PLIMER, I.R. (Ed.) – *Encyclopedia of Geology* (p. 95–102). – Elsevier, Hamburg.
- HERGERT, T., HEIDBACH, O., REITER, K., GIGER S.B. & MARSCHALL, P. (2015): Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland. – *Solid Earth* 6, 533–552.
- HERWEGH, M., BERGER, A., BAUMBERGER, R., WEHRENS, P. & KISSLING, E. (2017): Large-scale crustal-block-extrusion during Late Alpine collision. – *Nature sci. Rep.* 7/413.
- HEUBERGER, S., ROTH, P., ZINGG, O., NAEF, H. & MEIER, B.P. (2016): The St. Gallen Fault Zone: a long-lived, multiphase structure in the North Alpine Foreland Basin revealed by 3D seismic data. – *Swiss J. Geosci.* 109/1, 83–102.
- HINSKEN, S., USTASZEWSKI, K. & WETZEL, A. (2007): Graben width controlling syn-rift sedimentation: the Palaeogene southern Upper Rhine Graben as an example. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 96, 979–1002.
- HIRSCHBERG, S., WIEMER, S. & BURGHERR, P. (2015): Energy from the earth – deep geothermal as a resource for the future? – *TA-Swiss* 62, Bern, 220–251.
- HOFMANN, F. (1955): Beziehungen zwischen Tektonik, Sedimentation und Vulkanismus im Schweizerischen Molassebecken. – *Bull. Ver. schweiz Petroleum-Geol. u. -Ing.* 22/62, 5–18.
- (1956): Die OSM in der Ostschweiz und im Hegau. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 23/64, 23–35.
- (1957): Pliozäne Schotter und Sande auf dem Tannenber NW, St. Gallen. – *Eclogae geol. Helv.* 50, 477–482.
- (1957): Beziehungen zwischen Tektonik, Sedimentation und Vulkanismus im Schweizerischen Molassebecken. – *Bull. Ver. schweiz Petroleum-Geol. u. -Ing.* 22/62, 5–18.
- HOMEWOOD, P., ALLEN, P.A. & WILLIAMS, G.D. (1986): Dynamics of the Molasse Basin of western Switzerland. – *Spec. Publ. int. Assoc. Sedimentol.* 8, 199–217.
- HOMEWOOD, P., RIGASSI, D. & WEIDMANN, M. (1989): Le bassin molassique Suisse. In: PURSER, B.H. (Ed.): *Dynamique et méthodes d'étude des bassins sédimentaires* (p. 299–314). – Technip, Paris.
- HUGGENBERGER, P., DRESMANN, H. & ANDERS, B. (2016): «GeoMol-CH» – Geologisches 3D-Modell des schweizerischen Molassebeckens. Pilotgebiet Bodensee–Allgäu. – Univ. Basel (unpubl.).
- IBELE, T. (2011): Tectonics of the western Swiss Molasse Basin during Cenozoic times. – PhD Thesis Univ. Fribourg, *GeoFocus* 27.
- ISPRA [Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale] (2015): Modello geologico 3D e geopotenziali della Pianura Padana centrale (Progetto GeoMol). – *Rapporti ISPRA* 234, 104 e Append.
- JORDAN, P. (2004): Felsisohypsenkarte am Jurasüdfuss zwischen Oberbuchsitzen SO und Lenzburg AG. – *Rep. Imper Geologie, Heiligkreuz.*

- JORDAN, P. (2007): Digitales Höhenmodell der Basis des Quartärs (DHM B\_QU, «Felsmodell»). – Nagra Arbeitsber. NAB 07-12.
- (2010): Analysis of overdeepened valleys using the digital elevation model of the bedrock surface of northern Switzerland. – *Swiss J. Geosci.* 103, 375–384.
- (2016): Reorganisation of the Triassic stratigraphic nomenclature of northern Switzerland: overview and the new Dinkelberg, Kaiseraugst and Zeglingen formations. – *Swiss J. Geosci.* 109, 241–255.
- JORDAN, P., GRAF, H.R., EBERHARD, M., JOST, J., KÄLIN, D. & BITTERLI-DREHER, P.H. (2011): Blatt 1089 Aarau. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 135.
- JORDAN, P., MALZ, A., HEUBERGER, S., PIETSCH, J., KLEY, J. & MADRITSCH, H. (2015): Regionale geologische Profilschnitte durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Fernschubdeformation im östlichen Faltenjura. – Arbeitsbericht zu SGT-Etappe 2. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-105.
- JORDI, H.A., BITTERLI, T. & GERBER, M.E. (2003): Blatt 1108 Murgenthal. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Karte 113.
- KARICH, F. (2010): Erstellung eines Standalone-Programms zur Koordinatentransformation von GoCAD-Objekten im Projekt GEORG. – Bachelorarb. Univ. Freiberg. (unpubl.).
- KARNER, G.D. & WATTS, A.B. (1983): Gravity anomalies and flexure of the lithosphere at Mountain Ranges. – *J. geophys. Res.* 88, 10449–10477.
- KASTRUP, U., DEICHMANN, N., FRÖHLICH, A. & GIARDINI, D. (2007): Evidence for an active fault below the northwestern Alpine foreland of Switzerland. – *Geophys. J. int.* 169, 1273–1288.
- KAUFMANN, O. & MARTIN, T. (2008): 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. – *Computers & Geosci.* 34, 278–290.
- KEMPF, O., SCHLUNEGGER, F., STRUNCK, P. & MATTER, A. (1998): Paleomagnetic evidence for late Miocene rotation of the Swiss Alps: results from the north Alpine foreland basin. – *Terra Nova* 10, 6–10.
- KERRIEN, Y., TURREL, C., MONJUVENT, G., CHAROLLAIS, J., LOMBARD, A., BALMER, F., OLMARI, F., PAPILLON, R., FONTANNAZ, L., AMBERGER, G., RUCHAT, C., GREBERT, Y. & MARTHALER, M. (1998): Feuille 654 Annemasse. – *Carte géol. France* 1:50000, Carte 654, Bur. Rech. géol. min. [BRGM], Orléans.
- KETTIGER, D. (2016): Rechtlicher Rahmen für das Erheben, Nachführen und Verwalten von geologischen Daten. – *Ber. Landesgeol.* 9.
- KIM, Y.S. & SANDERSON, D.J. (2005): The relationship between displacement and length of faults: a review. – *Earth-Sci. Rev.* 68/3–4, 317–334.
- KLINGELÉ, E. (2009): Gravity survey of the Rhine Valley. Gravity interpretation, final report. – Amt f. Umwelt, Vaduz.
- (2012): Détermination des épaisseurs des remplissages quaternaires des vallées alpines et du Jura à l'aide de la gravimétrie – Rapp. final. *Comm. suisse Géophys. SGPK.*
- KOCAL, A., DUZGUN, H.S. & KARPUZ, C. (2007): An accuracy assessment methodology for the remotely sensed discontinuities: a case study in Andesite Quarry area, Turkey. – *Int. J. Remote Sensing* 28/17, 3915–3936.
- KUHLEMANN, J. & KEMPF, O. (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. – *Sediment. Geol.* 152, 45–78.
- LAHUSEN, P.H. & WYSS, R. (1995): Erdöl- und Erdgasexploration in der Schweiz: Ein Rückblick. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 62/141, 43–72.
- LANDESGEOLOGIE (2011): 3D-Geologie in der Landesgeologie, Qualitätssicherungs-Konzept (unpubl.).
- (2013): Guidelines and procedures for assessing the quality of geological cross sections (unpubl.).
- (2014a): Qualitätssicherung bei der Integration von Bohrdaten in eine Datenbank (unpubl.).
- (2014b): SASMB – Section Validation Summary Report; Report on the quality assessment of the SASMB cross sections (unpubl.).
- LANDESGEOLOGIE (2015): Schlussbericht Modellierung Felsoberfläche (unpubl.).
- (in Vorb.): Das Potenzial der Energieressourcen des tiefen Untergrunds der Schweiz.
- LARK, R.M., MATHERS, S.J., THORPE, S., ARKLEY, S.L.B., MORGAN, D.J. & LAWRENCE, D.J.D. (2013): A statistical assessment of the uncertainty in a 3-D geological framework model. – *Proc. Geologists' Assoc.* 124/6, 946–958.
- LAUBSCHER, H.P. (1961): Die Fernschubhypothese der Jurafaltung. – *Eclogae geol. Helv.* 54, 221–282.
- (2008): The Grenchenberg conundrum in the Swiss Jura: a case for the centenary of the thin-skin décollement nappe model (BUXTORF 1907). – *Swiss J. Geosci.* 101, 41–60.
- LINIGER, M., HÄNNI, R., NAGELISEN, J. & SCHNELLMANN, M. (2014): Ausgewählte Beobachtungen im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung des Standortgebiets Wellenberg. – Nagra Arbeitsber. NAB 13-71.
- LE, H.H., GABRIEL, P., GIETZEL, J. & SCHAEBEN, H. (2013): An object-relational spatio-temporal geoscience data model. – *Computer & Geosci.* 57, 104–117.
- LEU, W. (2014): Potenzial der Kohlenwasserstoff-Ressourcen in der Nordschweiz. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-70.
- LOUP, B. (1992): Evolution de la partie septentrionale du domaine helvétique en Suisse occidentale au Trias et au Lias: contrôle par subsidence thermique et variations du niveau marin. – Thèse Univ. Genève.
- LÜSCHEN, E., LAMMERER, B., GEBRANDE, H., MILLAHN, K. & NICOLICH, R. (2004): Orogenic structure of the Eastern Alps, Europe, from TRANSALP deep seismic reflection profiling. – *Tectonophysics* 388, 85–102.
- MADRITSCH, H. (2015): Outcrop-scale fracture systems in the Alpine foreland of central northern Switzerland: kinematics and tectonic context. – *Swiss J. Geosci.* 108, 155–181.
- MADRITSCH, H., MEIER, B., KUHN, P., ROTH, P., ZINGG, O., HEUBERGER, S., NAEF, H. & BIRKHÄUSER, P. (2013): Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. – Nagra Arbeitsber. NAB 13-10.
- MALZ, A., MADRITSCH, H., MEIER, B. & KLEY, J. (2016): An unusual triangle zone in the external northern Alpine foreland (Switzerland): Structural inheritance, kinematics and implications for the development of the adjacent Jura fold-and-thrust belt. – *Tectonophysics* 670, 127–143.
- MANHENKE, V. (1999): Überblick über das Geopotential des Landes Brandenburg. – *Brandenb. geowiss. Beitr.* 6, 5–20.
- MARCHANT, R. & BAUER, R. (2016): GeoMol-Vaud final report. – Direction générale de l'environnement (DGE) du canton du Vaud et musée cantonal de géologie (inéd.).
- MATTER, A. (1987): Faziesanalyse und Ablagerungsmilieus des Permokarbons im Nordschweizer Trog. – *Eclogae geol. Helv.* 80, 345–367.
- MATTER, A., HOMEWOOD, P., CARON, C., RIGASSI, D., STUIJVENBERG, J. VAN, WEIDMANN, M. & WINKLER, W. (1980): Flysch and molasse of western and central Switzerland. In: TRÜMPY, R. (Ed.): *Geology of Switzerland: a guide-book, Part B: geological excursions* (p. 261–293). – Wepf & Co., Basel.
- MATZENAUER, E. (2007): Spannungsanalyse der Mittelland Molasse des Kantons Freiburg anhand von Deformationserscheinungen an Geröllen und Bruchbildungen. – Masterarb. Univ. Freiburg.
- (2011): Tectonics of the Préalpes Klippen and the Subalpine Molasse (Canton Fribourg, Switzerland). – PhD Thesis Univ. Fribourg, *GeoFocus* 31.
- MAZZOTTI, M., BURDET, A., CONRAD, C., DIAMOND, L., HÄRING, M., LEU, W., LINIGER, H.U., SHELL, J. & ZAPPONE, A. (2013): Roadmap for a carbon dioxide capture and storage pilot project in Switzerland. – Rep. for swiss fed. Off. Energy.
- MCCANN, T. (2008): The geology of Central Europe. Vol. 1: Precambrian and Paleozoic. – *Geol. Soc. London.*

- MCCANN, T., PASCAL, C., TIMMERMAN, M.J., KRZYWIEC, P., LÓPEZ-GÓMEZ, J., WETZEL, A., KRAWCZYK, C.M., RIEKE, H. & LAMARCHE, C. (2006): Post-Variscian (end Carboniferous – Early Permian) basin evolution in Western and Central Europe. In: GEE, D.G. & STEPHENSON, R.A. (Ed.): *European lithosphere dynamics* (p.355–388). – Mem. geol. Soc. London 32.
- MEIA, J. (1966): Un accident tectonique sur le flanc sud du Mont-Aubert (Jura vaudois oriental, Suisse). – Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 89, 129–135.
- MEIER, B.P. (2010): Ergänzende Interpretation reflexionsseismischer Linien zwischen dem östlichen und westlichen Molassebecken. Gebiete Waadtland Nord, Fribourg, Berner Seeland und Jurasüdfuss zwischen Biel und Oensingen. – Nagra Arbeitsber. NAB 10-40.
- MEIER, B.P., KUHN, P., MUFF, S., ROTH, P. & MADRITSCH, H. (2014): Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-34.
- MEYER, M. (2000): Isohypses du toit de la Molasse. – Serv. géol. du canton de Genève (unpubl.).
- MOCK, S. (2016): GeoMol Bern. Final Report. – Univ. Bern (unpubl.).
- MÜLLER, B. (1995): Das Walensee-/Seeztal – eine Typusregion alpiner Talgenese, Vom Entstehen und Vergehen des grossen Rheintal/Zürichsees. – Diss. Univ. Bern.
- MÜLLER, W.H., NAEF, H. & GRAF, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien im Zürcher Weinland. – Nagra tech. Ber. NTB 99-08.
- NAEF, H., BIRKHÄUSER, P. & ROTH, P. (1995): Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren – Zürcher Weinland. – Nagra tech. Ber. NTB 94-14.
- NAEF, H. & MADRITSCH, H. (2014): Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbons: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-17.
- NAGRA (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. – Nagra tech. Ber. NTB 08-04.
- (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse. – Nagra tech. Ber. NTB 14-02.
- OBERHAUSER, R. (1998): Geologisch-tektonische Übersichtskarte von Vorarlberg 1:200 000. – Geol. Bundesanst., Wien.
- ORTNER, H., AICHHOLZER, S., ZERLAUTH, M., PILSER, R. & FÜGENSCHUH, B. (2015): Geometry, amount, and sequence of thrusting in the Subalpine Molasse of western Austria and southern Germany, European Alps. – *Tectonics* 34, 1–30.
- PANG, A.T., WITTENBRINK, C.M. & LODHA, S.K. (1997): Approaches to uncertainty visualization. – *The Visual Computer* 13, 370–390.
- PAOLACCI, S. (2012): Seismic facies and structural configuration of the Western Alpine Molasse basin and its substratum (France and Switzerland). – Univ. Geneva (unpubl.).
- PARRIAUX, A., BLUNIER, P., MAIRE, P., DEKKIL, G. & TACHER, L. (2010): Projet Deep City – Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains. – Rapp. Rech. PNR 54.
- PFIFFNER, O.A. (1986): Evolution of the north Alpine foreland basin in the Central Alps. – *Spec. Publ. int. Assoc. Sedimentol.* 8, 219–228.
- (2009): Geologie der Alpen. – Haupt, Bern.
- (2011): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), 1:100 000. – Geol. spec. Map 128, Explanatory notes.
- PFIFFNER, O.A., BURKHARD, M., HÄNNI, R., KAMMER, A., KLIGFIELD, R., MANCKTELOW, N.S., MENKVELD, J.W., RAMSAY, J.G., SCHMID, S.M. & ZURBRIGGEN, R. (2010): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), 1:100 000. – Geol. spec. Map 128.
- PFIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, ST. & STECK, A. (1997): Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20. – Birkhäuser Verlag, Basel.
- PFLEIDERER, S. (Hrsg.), GÖTZ, G., BOTTIG, M., BRÜSTLE, A.K., PORPACZY, C., SCHRELECHNER, M., EICHKITZ, C., JUD, M., SACHSENHOFER, R., ZOSSEDER, K., CASPER, S., GOLDBRUNNER, J., KRIEGL, C., KOLMER, C. & DIEPOLDER, G.W. (2016): GeoMol – Geologische 3D-Modellierung des österreichischen Molassebeckens und Anwendungen in der Hydrogeologie und Geothermie im Grenzgebiet von Oberösterreich und Bayern. – Abh. geol. Bundesanst. 70.
- PIEŃKOWSKI, G., SCHUDACK M.E., BOSÁK, P., ENAY, R., FELDMAN-OLSZEWSKA, A., GOLONKA, J., GUTOWSKI, J., HEMGREEN, G.F.W., JORDAN, P., KROBICKI, M., LATHUILIERE, B., LEINFELDER, R.R., MICHALIK, J., MÖNNIG, E., NOE-NYGAARD, N., PÁLFY, J., PINT, A., RASSER, M.W., REISDORF, A.G., SCHMID, D.U., SCHWEIGERT, G., SURLYK, F., WETZEL, A. & WONG, T.E. (2008): Jurassic. In: MCCANN, T. (Ed.): *The geology of Central Europe. Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic* (p. 823–922). – Geol. Soc. London.
- PIETSCH, J. & JORDAN, P. (2014): Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz – Version 2014 und ausgewählte Auswertungen. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-02.
- PLANCHEREL, R. (1979): Aspects de la déformation en grand dans les Préalpes médianes plastiques entre Rhône et Aar. Implications cinématiques et dynamiques. – *Eclogae geol. Helv.* 72, 145–214.
- PUGIN A. (1988): Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire en Suisse occidentale, avec quelques commentaires. – Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. 3.
- REISDORF, A.G. (2017): Bericht zur Literaturrecherche hydrogeologischer Daten der Nordschweiz. – Ber. z. H. Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo (unpubl.).
- REISDORF, A.G., WETZEL, A., SCHLATTER, R. & JORDAN, P. (2011): The Staffelegg Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland. – *Swiss J. Geosci.* 104, 97–146.
- REVERTERA, G.J. (1927): Ein tektonisches Problem aus den Prealpen. Die Reste der Simmen- und Breccienendecke. Ihre Lage in Bezug auf die axialen Schwankungen ihres Substrats. – Diss. Univ. Freiburg.
- REY, R., WILDBERGER, A., FRANK, S. & FREIMOSER, M. (2011): Blatt 1072 Winterthur. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Karte 140.
- RIGASSI, D. (1978): Bassin molassique sud-occidental. Carte géologique interprétative (sans Quaternaire). In: JUNG, P. (Ed.) (1982): Nouveaux résultats biostratigraphiques dans le bassin molassique, depuis le Vorarlberg jusqu'en Haute-Savoie. – Doc. Lab. Géol. Univ. Lyon, Mém. h. s. 7.
- RIME, V. (2015): Étude tectonique de la structure de Hermrigen. – Trav. Bachelor Univ. Fribourg (iné.).
- ROTH, P., NAEF, H. & SCHNELLMANN, M. (2010): Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordschweiz. – Nagra Arbeitsber. NAB 10-39.
- RUTSCH, R. (1947): Molasse und Quartär im Gebiet des Siegfriedblattes Rüeggisberg (Kt. Bern). – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 87.
- RYBACH, L. (1992): Geothermal potential of the Swiss Molasse Basin. – *Eclogae geol. Helv.* 85, 733–744.
- RYBACH, L., BÜCHI, U.P., BODMER, P. & KRÜSI, H.R. (1980): Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht. – *Eclogae geol. Helv.* 73, 293–310.
- SANS, M. & VERGÉS, J. (1995): Fold development related to contractional salt tectonics, southeastern Pyrenean thrust front, Spain. In: JACKSON, M.P.A., ROBERTS, D.G. & SNELSON, S. (Ed.): *Salt tectonics: a global perspective* (p.369–378). – Mem. amer. Assoc. Petroleum Geol. 65.
- SCHÄLLI, L. (2012): The diffuence of the Rhine glacier at Sargans in connection to the solid-rock surface model of the Rhine and Seez valley. – Master Thesis Univ. Zürich (unpubl.).
- SCHINDLER, C., HALDIMANN, P. & FREIMOSER, M. (2015): Felsisohypsenkarte des Gebietes von Atlasblatt Zürich (Taf. V). In: PAVONI, N., SCHINDLER, C., FREIMOSER, M., HALDIMANN, P. & LETSCH, D. (2015): Blatt 1091 Zürich. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 90.

- SCHLUNEGGER, F. (1995): Magnetostratigraphie und fazielle Entwicklung der Unteren Süsswassermolasse zwischen Aare und Limmat. – Diss. Univ. Bern.
- SCHLUNEGGER, F., JOST, J., GRÜNIG, A. & TRÜSSEL, M. (2016): Blatt 1169 Schüpfheim. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Erläut. 148.
- SCHLUNEGGER, F. & KISSLING, E. (2015): Slab rollback orogeny in the Alps and evolution of the Swiss Molasse basin. – *Nature Commun.* 6/8605.
- SCHLUNEGGER, F., MATTER, A. & MANGE, M.A. (1993): Alluvial fan sedimentation and structure of the southern Molasse Basin margin, Lake Thun area, Switzerland. – *Eclogae geol. Helv.* 86, 717–750.
- SCHMID, S.M., PFIFFNER, O.A., FROITZHEIM, N., SCHÖNBORN, G. & KISSLING, E. (1996): Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps. – *Tectonics* 15/5, 1036–1064.
- SCHOOP, R.W. & WEGENER, H. (1984): Einige Ergebnisse der seismischen Untersuchungen auf dem Bodensee. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 50/118, 55–61.
- SCHULTZ, R.A. & FOSSEN, H. (2002): Displacement-length scaling in three dimensions: the importance of aspect ratio and application to deformation bands. – *J. struct. Geol.* 24/9, 1389–1411.
- SCHULZ, G., SCHRADER, H.K., BADTKE, G., BODEMANN, W. & KLONKI, S. (1982): Bericht Bodensee 1980/81 über reflexionsseismische Messungen auf dem Bodensee. – *Prakla-Seismos GmbH Hannover*, Ber. 810 670 (unpubl.).
- SCHUPPLI, H.M. (1950): Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, III. Teil. – *Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser.* 26/3.
- SHELL (1978): Well report of Treycovagnes-I. – *Shell-Switzerland* (unpubl.).
- SIEGENTHALER, C., FINGER, W., KELTS, K. & WANG, S. (1987): Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. – *Eclogae geol. Helv.* 80, 241–260.
- SIGNER, C. & GORIN, G. (1995): New geological observation between the Jura and the Alps in the Geneva area, as derived from reflection seismic data. – *Eclogae geol. Helv.* 88, 235–265.
- SIGNORELLI, S., ANDENMATTEN BERTHOUD, N. & KOHL, T. (2004): Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz – Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz. – Bundesamt f. Energie BFE.
- SIGNORELLI, S. & KOHL, T. (2006): Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. – *Beitr. Geol. Schweiz, Geophys.* 39.
- SINCLAIR, H.D. (1997): Tectonostratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: An Alpine perspective. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 109/3, 324–346.
- SINCLAIR, H.D. & ALLEN, P.A. (1992): Vertical versus horizontal motions in the Alpine orogenic wedge: stratigraphic response in the foreland basin. – *Basin Res.* 4, 215–232.
- SOMMARUGA, A. (1997): Geology of the Central Jura and the Molasse Basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. – *Thesis Univ. Neuchâtel, Mém. Soc. neuchât. Sci. nat.* 12.
- SOMMARUGA, A., EICHENBERGER, U. & MARILLIER, F. (2012): Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. – *Matér. Géol. Suisse, Géophys.* 44.
- SOMMARUGA, A., GRUBER, M. & MOSAR, J. (2016): Synthèse des données géologiques utiles pour la construction d'un modèle du sous-sol du Canton de Fribourg. – *GeoFocus* 39.
- SPINATSCH, M. (2011): Aufgabenüberprüfung Landesgeologie: Darstellung und Beurteilung der landesgeologischen Aufgaben, Ressourcen und Produkte. – *Ber. z. H. Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo* (unpubl.).
- SPRECHER, C. & MÜLLER, W.H. (1986): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 82. – *Nagra tech. Ber. NTB* 84-15.
- ŠRAM, D., RMAN, N., RIŽNAR, I. & LAPANJE, A. (2015): The three-dimensional regional geological model of the Mura-Zala Basin, northeastern Slovenia. – *Geologija (Ljubljana)* 58/2, 139–154.
- STADT ST. GALLEN (2014): Sankt Galler Stadwerke; Abschreibung des Geothermieprojekts. – *Vorlage Stadtparlament* 2471.
- STAMPFLI, G.M. (1993): Le Briançonnais, terrain exotique dans les Alpes? – *Eclogae geol. Helv.* 86, 1–45.
- STRASKY, S., MORARD, A. & MÖRI, A. (2016): Harmonising the lithostratigraphic nomenclature: towards a uniform geological dataset of Switzerland. – *Swiss J. Geosci.* 109, 123–136.
- SWISSTOPO (2004): Geoinformation – Die Ressource des 21. Jahrhunderts. Aus nützlichen Daten werden vernetzte Dienste. – *Broschüre Geoinformation, Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo.*
- (2005): DHM25 - Das landesweite digitale Höhenmodell. – *Informationsbroschüre Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo.*
- (2006): Neue Koordinaten für die Schweiz – Der Bezugsrahmen LV95. – *Informationsbroschüre Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo.*
- (2017): swissALTI<sup>3D</sup> – Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz. – *Informationsbroschüre Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo.*
- TACHER, L., POMIAN-SRZEDNICKI, I. & PARRIAUX, A. (2006): Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models. – *Computers & Geosci.* 32/2, 212–221.
- TORABI, A. & BERG, S.S. (2011): Scaling of fault attributes: A review. – *Marine and Petroleum Geol.* 28/8, 1444–1460.
- TRÜMPY, R. (1959): Hypothesen über die Ausbildung von Trias, Lias und Dogger im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. – *Eclogae geol. Helv.* 52, 435–448.
- (1962): Mesozoischer Untergrund und älterer Molasse im schweizerischen und oberschwäbischen Molassebecken. – *Erdöl-Z.* 9, 523–527.
- (1980): *Geology of Switzerland: a guide-book.* – Wepf & Co., Basel.
- VOLLMAYR, T. (1992): Strukturelle Ergebnisse der Kohlenwasserstoffexploration im Gebiet von Thun, Schweiz. – *Eclogae geol. Helv.* 85, 531–539.
- VOLLMAYR, T. & WENDT, A. (1987): Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpenrand. – *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u.-Ing.* 53/125, 67–79.
- VOUILLAMOZ, N. (2015): Microseismic characterization of Fribourg area (Switzerland) by nanoseismic monitoring. – *PhD Thesis Univ. Fribourg, GeoFocus* 38.
- VOUILLAMOZ, N., MATZENAUER, E., MOSAR, J. & ABEDNEGO, M. (2010): Tectonic map of the central western Molasse Basin. – *Rep Resun AG, Univ. Fribourg* (unpubl.).
- VOUILLAMOZ, N., MOSAR, J. & DEICHMANN, N. (2017): Multi-scale imaging of a slow active fault zone: contribution for improved seismic hazard assessment in the Swiss Alpine foreland. – *Swiss J. Geosci.* 110, 547–563.
- WABER, H.N., BISSIG, P., HUGGENBERGER, P., MEYLAN, B., MILNES, E., SCHÜRCH, M. & WALTER, U. (2015): Tiefengrundwasser – Vorkommen, Nutzungspotenzial und Schutzwürdigkeit. – *Aqua & Gas* 4, 32–41.
- WALSH, J.J. & WATTERSON, J. (1988): Analysis of the relationship between the displacements and dimensions of faults. – *J. struct. Geol.* 10/3, 239–247.
- WATTERSON, J. (1986): Fault dimensions, displacements and growth. – *Pure and appl. Geophys.* 124/1–2, 365–373.
- WELLMANN, J.F., HOROWITZ, F.G., SCHILL, E. & REGENAUER-LIEB, K. (2010): Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. – *Tectonophysics* 490/3–4, 141–151.
- WELLMANN, J.F. & REGENAUER-LIEB, K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. – *Tectonophysics* 526–529, 207–216.
- WETZEL, A. & ALLIA, V. (2003): Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte. – *Eclogae geol. Helv.* 96, 451–469.
- WILDI, W. (1984): Isohypsenkarte der quartären Felstäler in der Nord- und Ostschweiz mit kurzen Erläuterungen. – *Eclogae geol. Helv.* 77, 541–551.

- WILLIAMS, R. & VAN DEMARK, P. (1987): Selling a geographical information system to government policy makers. – Pap. Annu. Conf. Urban and Reg. Inform. Syst. Assoc. 3, 150–156.
- WULLSCHLEGER, E. (2005): Das Bohnerz von Küttigen – Entstehung, Fossilien- und Mineralgehalt. – Mitt. aargau. natf. Ges. 36, 27–60.
- WYCISK, P., HUBERT, T., GOSSEL, W. & NEUMANN, C. (2009): High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. – Computers & Geosci. 35/1, 165–182.
- WYSSLING, G. (2008): Felsisohypsenkarten des Gebietes von Atlasblatt Uster (Taf. III). In: WYSSLING, G., GUBLER, T. & NAGY, P. (2008): Blatt 1092 Uster. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 128.
- ZAUGG, A., BLASS, A. & WESSELS, M. (2008): Blatt 1055 Romanshorn. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 125.
- ZIEGLER, P.A. (1990): Geological atlas of western and central Europe 1990. – Shell int. Petroleum Maatsch. B.V.
- (2005): Europe – Permian to Recent Evolution. In: SELLEY, R.C., COCKS, L.R. & PLIMER, I.R. (Ed.): Encyclopedia of Geology (p. 102–125). – Elsevier, Hamburg.
- ZHU, L. & ZHUANG, Z. (2010): Framework system and research flow of uncertainty in 3D geological structure models. – Min. Sci. and Technol. 20/2, 306–311.





### Strukturkarten Störungen auf der Höhe von drei modellierten Horizonten

geologisch und kartographisch bearbeitet von  
Eva Kurrmann und C. Salomé Michael

Massstab 1:350 000



#### Strukturkarte Felsoberfläche

— 500m — Felsoberfläche (Äquidistanz 100m)

Höhe Felsoberfläche



#### Känozoikum

Obere Süsswassermolasse (OSM)

Obere Miozänmolasse (OMM)

Untere Miozänmolasse (UMM) und  
Untere Süsswassermolasse (USM)

Molasse Sedimente, uncliff.: subalpine Molasse

#### Mesozoikum

Sedimente der Kreide

Oberer Malm

Unterer Malm

Dogger

Lias

Krager

Muschelkalk

#### Strukturkarte Basis «Känozoikum»

— 500m — Isohypsen (Äquidistanz 100m)

Höhe Basis «Känozoikum»



#### Sedimente der Kreide

Oberer Malm

#### Strukturkarte Top Dogger

— 500m — Isohypsen (Äquidistanz 100m)

Höhe Top Dogger



#### Datengrundlage

— Seismische Sektion

● Bohrung

Alt	Altshofen-1	Lda	Lindau-1
Ber	Baselen	Lof	Lösch-1
Ber	Berlingen-1	Plf	Plaffau-1
Bas	Boswil-1	Plf	Plaffau SGG-1
Ch	Chapel-1	Rok	Rohrer
Cou	Courton-1	Rom	Romans-1
Cou	Courmy-1	Sof	Schaffhausen
Ecl	Eclépens-1	Sav	Savigny-1
Enl	Enlène-1	Sca	St. Gallen-1
Fen	Fendingen-1	Sca	St. Gallen-1
Hen	Henningen-1	Sof	Schaffingen-1
Her	Herdern-1	Sof	Soren-1
Hum	Humilly-2	Thu	Thun-1
Hor	Hörsingen-1	Thu	Thun-1
Kna	Knaulingen-1	Tsu	Tschuggen-1
Kna	Knaul-1	Tug	Tuggen
Wau	Wauwil-1	Wau	Wauwil-1

#### Modellierte Störungen

— Auf-/Überschiebung

— Abschiebung

— Störung l. Allg.

Aa	Aaretal	EL	Eclépens-Lovatsen	LC	Le Cointin	Lä	Lägern	SCL	St. Cergue-Lösch
AE	Aubonne-Eclépens	EM	Emy-Morges	LC	Le Cointin	Se	Sekette	Se	Sekette
Al	Altköfen	Ep	Epesses	Li	Linsgagn	SG	Schaffhausen-Hornbach	SG	Schaffhausen
Am	Amriswil	Er	Ernstschwyl	LL	La Lanco	Sgl	Siggiswil	Sgl	Siggiswil
An	Andelfingen	Est	Essertenne	La	La Courneuve	LSa	La Sauge	Wf	Wädenswil
Ar	Arve	Et	Etterken	LSu	Le Suchet	Sig	Siggenthal	Wf	Wädenswil
Au	Ausserberg	Fen	Fendingen	Lu	Lutrive	SS	St. Simeon	Wf	Wädenswil
BC	Balmuccia-Chambion	Fi	Fimmettal	Mar	Marschthal	Su	Sulzgen	Wf	Wädenswil
BE	Born-Engelberg	Fu	Fudenberg	Ma	Menzingen	Suc	Suedgau-Chambion	Wf	Wädenswil
Ber	Berlingen	Gr	Gruetzwil	Ne	Neschenen	SV	St. Vrain	Wf	Wädenswil
BK	Born-Kölliken	Gu	Guggen	No	Noffen	Stu	St. Ursen	Wf	Wädenswil
Brü	Bruggen	Gül	Gümling	Os	Oswingen	Tsu	Tschuggen	Wf	Wädenswil
Bri	Brügglen	Ha	Hasenmatt	Pa	Passy	Un	Unterweningen	Wf	Wädenswil
BY	Bonnets-Viviers	Ha	Häggenschwil	Pay	Payenne	Wal	Wädenswil	Wf	Wädenswil
Cha	Chasdenberg	Her	Herzogen	Plf	Plaffau	Wen	Wenggen	Wf	Wädenswil
Cha	Chasseral	Hbn	Hornbach	Plf	Plaffau	Wf	Wädenswil	Wf	Wädenswil
Chu	Churzenberg	Hbu	Hornburg	Ra	Randen	Wo	Wöhren	Wf	Wädenswil
Cou	Courton	HSM	Hauptstadt der Molasse	Rib	Ribeswil-Baumes	Wy	Wyss	Wf	Wädenswil
Cu	Courmayeur	JH	Jura-Hauptstadt	Rom	Romans	Zu	Zug	Wf	Wädenswil
D	Dornon	JH	Jura-Hauptstadt	Rus	Romans				
D	Dornon	JH	Jura-Hauptstadt	Sav	Savigny				
Eg	Eglisau	Ka	Kasowitz	Sch	Schindellegi				

Die aus GeoMod 11 generierten Karten und Profile können nicht ohne weiteres in andere GIS-Systeme übertragen werden. Die Verantwortung für die Nutzung der Daten liegt bei den Anwendern. Die Verantwortung für die Genauigkeit der Daten liegt bei den Erhebungsstellen. Die Verantwortung für die Genauigkeit der Karten liegt bei der Landesgeologie.