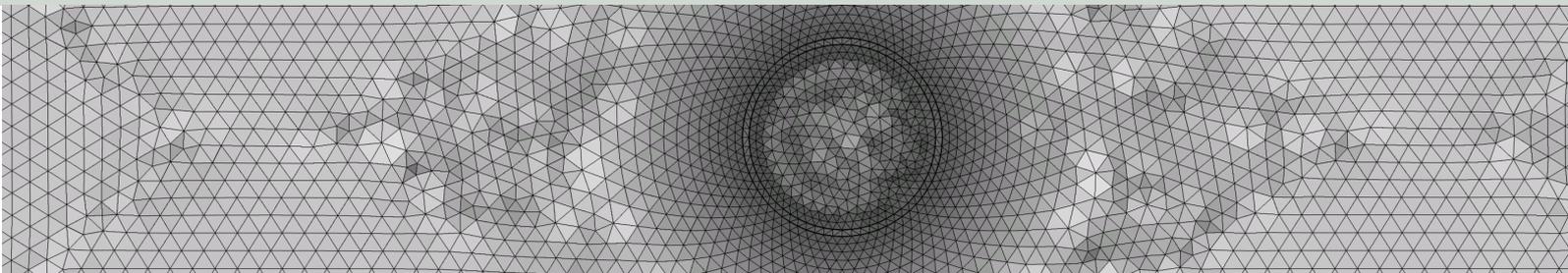




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D Seismik der Nagra

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager

Prof. Dr. E. Kissling
Prof. Dr. A-G. Milnes
Dr. M. Riede
Dr. A. Sommaruga
Prof. Dr. F. Wenzel

Dezember 2016, Änderungen vom November 2018

Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik der Nagra im Hinblick auf Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager

mit Expertenbeiträgen von:

**Prof. Dr. E. Kissling
Prof. Dr. A-G. Milnes
Dr. M. Riede
Dr. A. Sommaruga
Prof. Dr. F. Wenzel**

Dezember 2016, Änderungen vom November 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung des ENSI	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Vorgehen	1
1.3	Prüfungsschwerpunkte	3
1.4	Beurteilungsgrundlagen	6
1.5	Stellungnahme des ENSI zur 2D-Seismik der Nagra in Etappe 2 SGT	8
1.5.1	Datengrundlage und Vorgehen	11
1.5.2	Seismische Datenverarbeitung	12
1.5.3	Interpretation der seismischen Daten	13
1.5.4	Tiefenlage und Mächtigkeit	14
1.5.5	Störungen	15
1.5.5.1	Regionale Störungszonen	15
1.5.5.2	Zu meidende tektonische Zonen (zmtZ)	15
1.5.5.3	Anordnungsbestimmende Störungen	18
1.5.6	Vergleichbarkeit von reprozessierter und neuer 2D-Seismik	19
1.6	Referenzen	20
2	Expertenbericht Dr. M. Riede	23
2.1	Zusammenfassung	24
2.2	Teilaspekt seismische Datenverarbeitung in Zeit	24
2.2.1	Resümee	24
2.2.2	Einleitung	25
2.2.2.1	Vorgehen	25
2.2.2.2	Prüfungsschwerpunkte und Beurteilungsgrundlage	25
2.2.2.3	Aufbau der vorliegenden Stellungnahme	27
2.2.3	Festlegung der Bearbeitungssequenz	27
2.2.4	Datenverarbeitung	29
2.2.4.1	Bearbeitungssequenz	29
2.2.4.2	CRS –Bearbeitung	33
2.2.4.3	Mis-Fit-Korrektur	39
2.2.4.4	Seismic-to-well-tie	41
2.2.5	Sensitivitätsanalyse	42
2.2.6	Qualitätssicherung	43
2.3	Teilaspekt seismische Datenverarbeitung in Tiefe	44
2.3.1	Resümee	44
2.3.2	Einleitung	44
2.3.2.1	Vorgehen	45
2.3.2.2	Prüfungsschwerpunkte	45
2.3.2.3	Beurteilungsgrundlage	45
2.3.2.4	Aufbau der vorliegenden Stellungnahme	45
2.3.3	Datenverarbeitung	46
2.3.3.1	Bearbeitungssequenz	46
2.3.3.2	Implementierung	47
2.3.3.3	Zeit-Tiefen-Konvertierung	48

2.3.3.4	Zusammenfassung	49
2.3.4	Sensitivitätsanalyse/Beschreibung der Unsicherheiten	50
2.3.5	Qualitätssicherung	51
2.3.6	Fazit	51
2.4	Literaturverzeichnis	52
3	Expertenbericht Prof. Dr. F. Wenzel	55
3.1	Zusammenfassung	56
3.2	Datenakquisition und Datenverarbeitung	56
3.3	Belastbarkeit der 2D-Seismik für Einengungsentscheidungen	58
3.4	Zu den Nordschweizer Standorten im Einzelnen	61
3.5	Die spezifischen Fragen des ENSI	62
3.6	Referenzen	66
4	Expertenbericht Prof. Dr. A-G. Milnes	69
4.1	Einführung	71
4.2	Beurteilungsunterlagen	71
4.3	Die interpretierten Referenzprofile	72
4.3.1	Referenzprofile in Zeit (NAB 13-10, Beilage 5 und Anhang A)	73
4.3.2	Tiefenkonvertierte Referenzprofile (NAB 14-34, Anhang 2)	73
4.3.3	Bewertung	75
4.4	2D-Seismik als Basis für die Festlegung der Lagerperimeter	75
4.4.1	Vermeidungsstrategie der Nagra ("avoidance strategy")	76
4.4.2	Eignungsstrategie ("suitability strategy") als Alternative	78
4.4.3	Bewertung	81
4.5	2D-Seismik als Basis für statistische oder quantitative Analysen	82
4.5.1	Bewertung	83
4.6	Detailanalyse der seismische Daten in stratigraphisch-sedimentologischer Hinsicht	83
4.6.1	Effinger-Schichten	83
4.6.2	'Brauner Dogger'	83
4.6.3	Bewertung	84
4.7	Beantwortung der ENSI-Leitfragen und -Ergänzungsfragen zu den Ergebnissen der 2D-Seismik Kampagne	84
4.8	Referenzen	87
	Anhang 1	89
5	Expertenbericht Prof. Dr. E. Kissling	93
5.1	Fragestellung und Vorgehensweise	94
5.2	Erarbeitung und seismische Interpretation der 2D-Seismik	95
5.3	Aussagekraft der Strukturinformation zur Bewertung der Standortgebiete bezüglich „Platzangebot“	102

5.4	Laterale Kontinuität von Faziesbereichen im Braunen Dogger und in den Effinger Schichten	103
5.4.1	Effingerschichten (NAB 14-57)	103
5.4.2	„Brauner Dogger“ (NAB 14-58)	104
5.5	Schlussbemerkungen	104
5.6	Antworten zu den „ergänzenden Fragen“ (Kapitel 1.3)	105
5.7	Referenzen	109
6	Expertenbericht Dr. A. Sommaruga	113
6.1	Introduction	121
6.1.1	Goal of the review	121
6.1.2	Questions to be addressed	122
6.1.2.1	Questions of “Schritt 1 von SGT - Etappe 2“	122
6.1.2.2	Questions of “Schritt 2 von SGT - Etappe 2“	122
6.1.2.3	Additional questions on specific seismic lines for siting regions	122
6.1.2.4	Additional questions concerning tectonic zones to be avoided and space requirement	123
6.1.3	Participation in meetings	124
6.1.4	Relevant Nagra reports for the assessment	125
6.2	Data	127
6.2.1	Critical overview on contents of Nagra reports	127
6.2.2	Seismic data	129
6.2.3	Well data	131
6.2.4	Depth conversion of seismic profiles	136
6.2.5	Seismic maps	136
6.3	Geological elements interpreted on seismic profiles	136
6.3.1	Seismic horizons	136
6.3.2	Classification of the reflection quality of interpreted seismic horizons	138
6.3.3	Fault definition	140
6.3.4	Classification of seismically interpreted faults	143
6.3.5	Interpretation of faults by Nagra	144
6.3.6	Geological structures	145
6.4	Discussion of geological features on seismic profiles in defined geological siting region	150
6.4.1	Südranden siting region	150
6.4.2	Zürich Nordost siting region	152
6.4.3	Nördlich Lägern siting region	159
6.4.4	Jura Ost siting region	165
6.4.5	Jura-Südfuss siting region	170
6.5	Answers to addressed questions	174
6.5.1	Answers to questions of “Schritt 1 von SGT - Etappe 2“	174
6.5.2	Answers to questions of “Schritt 2 von SGT - Etappe 2“	174
6.5.3	Answers to additional questions on specific seismic lines for siting regions	175
6.5.4	Answers to additional questions concerning tectonic zones to be avoided and space requirement	176
6.5.4.1	Tectonic zone to be avoided in the Nördlich Lägern siting region.	176
6.5.4.2	Space requirement	178

6.6	Statement	178
6.7	References	179

Zusammenfassung

Wichtiger Bestandteil des Untersuchungsprogrammes der Nagra zu Etappe 2 SGT waren die reflexionsseismischen Untersuchungen. Die Resultate dieser 2D-Seismik spielen eine entscheidende Rolle bei der Festlegung der Lagerperimeter und somit für den sicherheitstechnischen Vergleich zwischen den Standortgebieten.

Aus diesem Grund setzte das ENSI zur Beurteilung der seitens Nagra eingereichten Unterlagen zur 2D-Seismik ein Team aus externen Experten ein. Dieses Team beurteilte die Datenverarbeitung und die geologisch-tektonische Interpretation der reprozessierten und neuen 2D-Seismik und tauschte sich während der laufenden Beurteilung mehrfach fachlich aus.

Der vorliegende Bericht fasst die Informationen zum Beurteilungsprozess des ENSI und seiner Experten sowie die Resultate aus diesen Beurteilungen zusammen. In der Einleitung (Kapitel 1) geht das ENSI ergänzend zu den Informationen im Gutachten des ENSI zu Etappe 2 SGT vertieft auf seine Beurteilung der 2D-Seismik der Nagra ein. Die Beurteilung des ENSI stützt sich auf die Stellungnahmen der Experten (Kapitel 2 bis 6).

1 Einleitung des ENSI

1.1 Ausgangslage

In Etappe 1 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) wurden von der Nagra sechs Standortgebiete (Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost, Jura Südfuss und Wellenberg) für SMA-Lager und drei Standortgebiete (Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost) für HAA-Lager vorgeschlagen. Die Auswahl dieser Standortgebiete ist seitens ENSI bestätigt worden (ENSI 33/070).

Im Rahmen von Etappe 2 SGT hat die Nagra ein breites Untersuchungsprogramm durchgeführt, um u.a. die geologischen Kenntnisse in den Standortgebieten zu verbessern und die Einengung der Standortgebiete auf mindestens zwei Standortgebiete pro Lagertyp zu begründen. Wichtiger Bestandteil des Untersuchungsprogrammes waren die reflexionsseismischen Untersuchungen. Die Resultate dieser 2D-Seismik spielen eine entscheidende Rolle bei der Festlegung der Lagerperimeter und somit für den sicherheitstechnischen Vergleich zwischen den Standortgebieten.

Die im Rahmen der Etappe 2 SGT verwendeten Daten der 2D-Seismik der Nagra umfassen reprozessierte Seismik-Daten aus älteren Kampagnen sowie Daten der 2D-Seismik-Kampagne im Winter 2011/2012.

Entsprechend der Wichtigkeit der 2D-Seismik-Resultate hat das ENSI zur Beurteilung der eingereichten Unterlagen zur 2D-Seismik ein Team aus externen Experten eingesetzt. Dieses Team hat die Datenverarbeitung und die geologisch-tektonische Interpretation der reprozessierten und neuen 2D-Seismik beurteilt und tauschte sich während der laufenden Beurteilungsarbeiten (August 2013 bis Sommer 2015) an diversen Fachsitzungen aus.

Der vorliegende Bericht umfasst einerseits (als Ergänzung zu den Erörterungen im ENSI-Gutachten, ENSI 33/540) eine ausführlichere Stellungnahme des ENSI zur 2D-Seismik der Nagra in Etappe 2 SGT (Kapitel 1.5), andererseits die im Zusammenhang mit der 2D-Seismik entstandenen Expertenberichte (Kapitel 2 bis 6). Die Beurteilungen der Experten sind in die Stellungnahme des ENSI eingeflossen.

1.2 Vorgehen

Der Review der Unterlagen begann im August 2013 und wurde mit dem Einreichen der finalen Berichte der Experten im Sommer 2015 abgeschlossen. Die Datenverarbeitung und geologisch-tektonische Interpretation der 2D-Seismikdaten wurde seitens der Nagra umfangreich dokumentiert (Kapitel 1.4). Damit die Beurteilungsarbeiten mit der notwendigen Tiefe durchgeführt werden konnten, hat das ENSI die Reviewarbeiten in zwei Schritten durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die vorliegenden Referenzberichte der Nagra zur Datenverarbeitung der 2D-Seismik in Zeit sowie die damit verbundene seismische Interpretation beurteilt. Nach dem Vorliegen der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismikdaten in Tiefe (NAB 14-34) erfolgte deren Beurteilung im Schritt 2.

Mit der Beurteilung der Datenverarbeitung wurden Dr. M. Riede und Prof. Dr. F. Wenzel, für die geologisch-tektonische und strukturgeologische Interpretation Prof. Dr. E. Kissling, Prof. Dr. A.-G. Milnes und Dr. A. Sommaruga beauftragt.

Im Rahmen des Reviews wurden mehrere Fachsitzungen durchgeführt. Anlässlich der Kick-off Sitzungen zu den beiden Review-Schritten war jeweils die Nagra vor Ort, um Fragen zum Datensatz und zur Dokumentation zu beantworten. Zur vertieften Faktenklärung wurden ausserdem zwei Fachsitzungen bei den Experten der Nagra zur Datenverarbeitung (DMT Petrologic GmbH, Hannover, und Proseis AG, Zürich) durchgeführt. Vor Abschluss des Reviews wurden anlässlich von Reviewmeetings die Ergebnisse ausgetauscht und diskutiert.

An den Fachsitzungen des ENSI nahmen teilweise die Experten der AG SiKa/KES teil. Zweck der gemeinsamen Sitzungen war es, für alle Reviewer einen gleichen Informationsstand zu gewährleisten, den fachlichen Austausch zwischen den Experten zu fördern und die gegenseitige kritische Hinterfragung der Beurteilungsergebnisse zuzulassen. Die in diesem Dokument vorliegenden Expertenberichte beinhalten ausschliesslich fachliche Einschätzungen der jeweiligen Autoren und stellen keine gemeinsame Position der am Review beteiligten Experten oder Organisationen dar.

Liste der abgehaltenen Fachsitzungen zum 2D-Seismik-Review:

Die in Klammern angegebenen Nummern der ENSI-Aktennotizen verweisen auf die entsprechenden Protokolle der Sitzungen.

19. August 2013	Kick-off Meeting der ENSI-Experten für den Review der 2D-Seismik der Nagra im Rahmen von Etappe 2 SGT in Brugg (ENSI 33/314)
23. September 2013	Review-Meeting zur 2D-Seismik-Datenverarbeitung für Etappe 2 SGT bei DMT Petrologic GmbH in Hannover (ENSI 33/321)
22. November 2013	Review Interpretation 2D-Seismik: Meeting bei Proseis AG in Zürich (ENSI 33/332)
31. März 2014	Workshop: Diskussion der Experten-Ergebnisse der Beurteilung der 2D-Seismik der Nagra im Rahmen von Etappe 2 SGT – Schritt 1 in Brugg (ENSI 33/359)
7. November 2015	Review der 2D-Seismik SGT Etappe 2: Meeting zu Schritt 2 in Brugg (ENSI 33/410)
6. Februar 2015	Kick-off Sitzung aller Experten zur Detailprüfung des ENSI in Brugg (ENSI 33/417)
10. März 2015	Fachgespräch zur Interpretation der 2D-Seismik Etappe 2 SGT in Zürich (ENSI 33/430)
11. März 2015	Fachgespräch zur Datenverarbeitung der 2D-Seismik Etappe 2 SGT in Hannover (ENSI 33/431)
27. April 2015	Workshop: Diskussion der Experten-Ergebnisse der Beurteilung der 2D-Seismik der Nagra im Rahmen von Etappe 2 SGT – Schritt 2 in Brugg (ENSI 33/436)

Zwecks Abstimmung zwischen dem ENSI und seinen Experten wurden mit einzelnen Experten weitere Sitzungen durchgeführt.

1.3 Prüfungsschwerpunkte

Die Beurteilungsarbeit fokussierte auf die nordschweizerischen Standortgebiete gemäss Etappe 1 SGT, d.h. auf die dort vorhandenen geologisch-tektonischen Elemente, welche einen Einfluss auf die Standortgebiete haben. Für die Beurteilung der Unterlagen standen zu Beginn der Beurteilungsarbeiten folgende Aufgaben und Fragestellungen im Vordergrund:

Übergeordnete Aspekte

Frage 1:

Entsprechen die durchgeführten Arbeiten und die angewandten Techniken dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik bzw. sind diese stufengerecht?

Frage 2:

Erfolgte die Erarbeitung der Unterlagen mit der notwendigen Sorgfalt und Qualitätssicherung?

Frage 3:

Sind die Ungewissheiten und Unsicherheiten ausreichend spezifiziert?

Datenverarbeitung

Frage 4.1:

Sind die Schritte der Datenverarbeitung (u.a. Vorbereitung, Dekonvolution, konventionelle und CRS-Stapelung, Migration) nachvollziehbar und mit der nötigen Sorgfalt hinsichtlich der gegebenen Fragestellung durchgeführt worden?

Frage 4.2:

Wurde bei der Datenverarbeitung der seismischen Linien der Unsicherheit bedingt durch die Möglichkeit der Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt und diese hinreichend beschrieben?

Frage 4.3:

Wie wirkt sich das Verfahren zur Optimierung des Signal/Rauschen-Verhältnisses im Hinblick auf das Erkennen von Störungen und Strukturen aus?

Frage 4.4:

Sind die Ungewissheiten und Unsicherheiten in der Datenverarbeitung ausreichend spezifiziert?

Frage 4.5:

Sind die Überprüfung des Schichtmodells durch die Nagra auf Konsistenz bzw. Abweichungen mit den Seismikdaten in Tiefe und die daraus resultierende Entscheide zur Anpassung des Schichtmodells nachvollziehbar?

Frage 4.6:

Sind die Ungewissheiten und Unsicherheiten in der gesamten 2D-Seismik-Datenverarbeitung ausreichend spezifiziert?

Geologisch-tektonische Interpretation der 2D-Seismik

Frage 5.1:

Sind die Interpretationen der Strukturen der seismischen Linien nachvollziehbar?

Frage 5.2:

Wurde bei der seismischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u. U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Frage 5.3:

Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen, von anordnungsbestimmenden Störungen und von zu meidenden tektonischen Zonen nachvollziehbar?

Frage 5.4:

Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien vollständig?

Frage 5.5:

Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u. U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Frage 5.6:

Mit welcher Zuverlässigkeit kann aus der Seismik ein Rückschluss auf die laterale Kontinuität von Faziesbereichen im Braunen Dogger und in den Effinger Schichten gezogen werden?

Im Verlaufe des Beurteilungsprozesses wurden weitere, präzisierende Fragen bzgl. der geologisch-tektonischen Interpretation ergänzt. Diese Fragen werden in den Berichten der entsprechenden Experten (Kapitel 2 bis 6) beantwortet.

Frage 6 Zu meidende tektonische Zone im nördlichen Bereich des Standortgebietes Nördlich Lägern“

Für das Standortbiet NL spielt die zu meidende tektonische Zone (zmtZ) (Abbildung 1-1) eine entscheidende Rolle für das Platzangebot. Aufgrund der Relevanz dieser zmtZ hat das ENSI für den 2D-Seismik-Review eine Zusatzfrage formuliert. Zur Beantwortung der Frage sollen neben den Befunden aus der 2D-Seismik auch Erkenntnisse aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland (NTB 00-03) sowie aus den gravimetrischen Untersuchungen (NAB 13-40) berücksichtigt werden.

Die Nagra definiert die zmtZ als Gebiete, welche im Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen liegen, welche mehrheitlich mit dem Nordschweizer Permokarbonat assoziiert sind, sowie von Antiklinalstrukturen im Nahbereich des Faltenjuras (NTB 14-02 Dossier II, Kapitel 4.4.2). Die Datengrundlage in Standortgebiet Nördlich Lägern besteht aus der 2D-Seismik und den Gravimetriedaten (NAB 13-40). Im Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO) erfolgt deren Abgrenzung auch anhand der 3D-Seismik. Anhand der Ergebnisse der Attribut-Analysen der 3D-Seismik (NTB 14-02 Dossier II, Seite 77; NTB 00-03) zeigt die Nagra den Zusammenhang zwischen der Randzone des Nordschweizer Permokarbonates, der Rafz-Marthalen-Flexur und den mit der Attributanalyse der 3D-Seismik detektierten Strukturzonen (NTB 14-02 Dossier II, Kapitel 4.5.2) auf. Der Norden des Standortgebiets NL wird gemäss der Interpretation aller Daten und der Erkenntnisse aus den oben beschriebenen Zusammenhängen in ZNO von der Nagra als zmtZ bewertet (NTB 14-02 Dossier II, Kapitel 4.5.3). Das ENSI hat der Nagra bzgl. der Abgrenzung der zmtZ im Norden von NL eine Frage gestellt (NAB 17-01, Frage 28). In ihrer Antwort stützt die Nagra die Ausweisung der zmtZ zusätzlich mit Neigungskarten des Horizonts Top Lias.

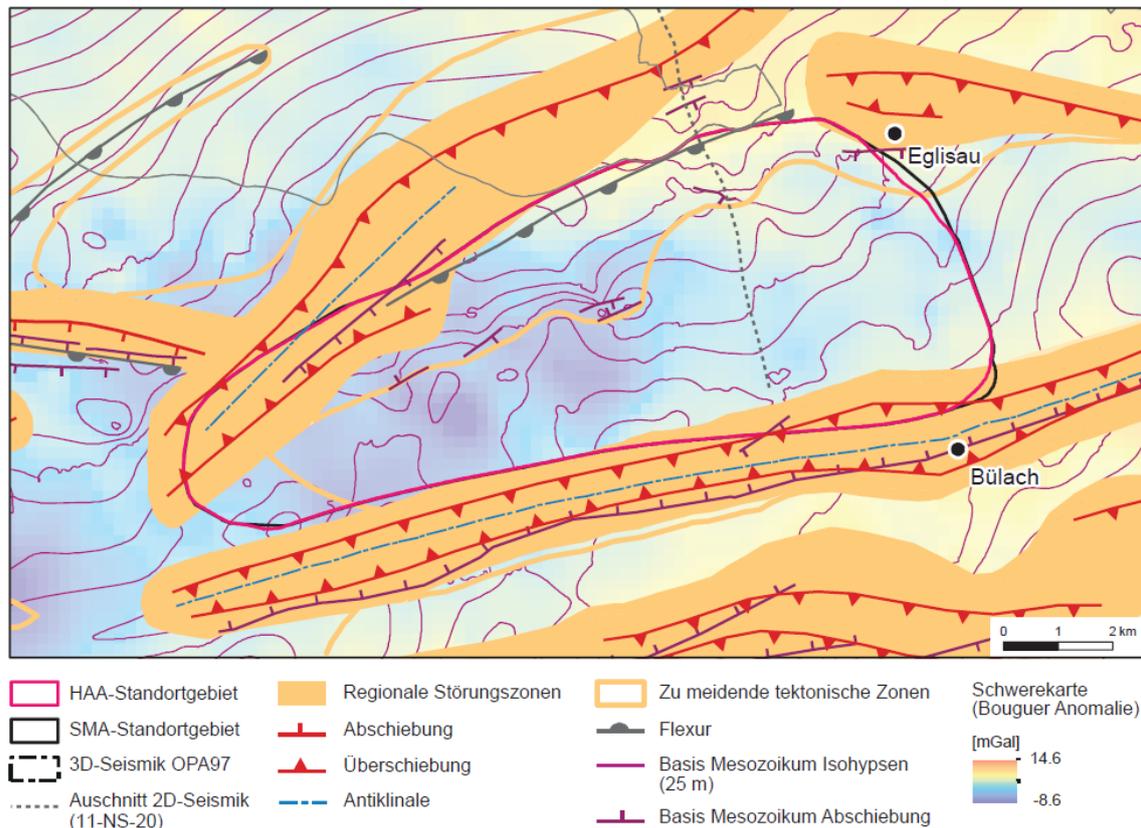


Abbildung 1-1: Zu meidende tektonische Zone in Nördlich Lägern (NTB 14-02 Dossier II, Fig. 4.4-5)

Das ENSI hat dazu den Experten die folgenden konkreten Fragen gestellt:

Frage 6.1:

Ist der Zusammenhang zwischen dem Rand des Nordschweizer Permokarbondrogens, der Flexur (NTB 14-01, Dossier II, Fig 4.4-5) und dem Störungsbild aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland belastbar?

Frage 6.2:

Wie aussagekräftig sind die Neigungskarten des Top Lias? (Bitte um Aussage zur Auflösungs-möglichkeit und Genauigkeit)

Frage 6.3:

Ist die von der Nagra auf Basis der 2D-Seismik ausgewiesene Flexur am nördlichen Rand des Standortgebiets NL nachvollziehbar und belastbar?

Frage 6.4:

Kann aufgrund der Erfahrungen aus dem Standortgebiet ZNO (Hinweis auf Zusammenhang zwischen Permokarbondrog, Flexur und Strukturzone) für das Standortgebiet Nördlich Lägern eine potentielle Strukturzone antizipiert werden? (Gemäss Erfahrungen aus ZNO können solche Strukturzone erst mit der 3D-Seismik erfasst werden.)

Frage 7: „Differenzierung bzgl. tektonischer Zergliederung bei der Abschätzung des Platzbedarfs“

Zur Ermittlung des standortspezifischen Platzbedarfs (NAB 14-99) trifft die Nagra Annahmen zur Anzahl der zu erwartenden Störungszonen in Richtung des Fallens bzw. Streichens. Diese Annahmen führen schlussendlich zum deutlich unterschiedlichen Platzbedarf der einzelnen Standortgebiete. Die Nagra begründet die Annahme u. a. qualitativ mit den Ergebnissen aus dem NAB 14-88. Die von der Nagra getroffenen Annahmen bzgl. der Anzahl Störungen im Streichen und Fallen in den einzelnen Standortgebieten sind in Tabelle 1-1 dargestellt.

	Anzahl Störungszonen in Fallrichtung [Stk]	Anzahl Störungszonen in Streichrichtung [Stk]	Ausdehnung Störungszone [m]
SMA			
Südranden	0-1	0-1	50-200
Zürich Nordost	0-1	0-1	50-200
Nördlich Lägern	0-3	0-1	100-200
Jura Ost	0-2	0-2	100-200
Jura-Südfuss	0-4	0-2	50-100
HAA			
Zürich Nordost	0-1	0	150
Nördlich Lägern	1-3	0-1	150
Jura Ost	0-2	0-1	100

Tabelle 1-1: Annahmen der Nagra zur Anzahl anordnungsbestimmender Störungen innerhalb der Lagerperimeter aller betrachteter Standortgebiete der Nordschweiz gemäss NAB 14-99.

Das ENSI hat dazu den Experten die folgenden konkreten Fragen gestellt:

Ist es fachlich nachvollziehbar und gerechtfertigt, eine unterschiedliche Anzahl an anordnungsbestimmenden Störungen in den Lagerperimeter der Standortgebiete anzunehmen (zum Beispiel dass für die Standortgebiet NL und JS die Anzahl der Störungszonen viel grösser ist als für die anderen)? Wenn ja, was ist die Datengrundlage für diese Annahme?

1.4 Beurteilungsgrundlagen

Für die Beurteilungsarbeiten der Experten standen nachfolgende Berichte der Nagra im Mittelpunkt. Sofern die Experten im Rahmen der Beurteilungsarbeiten Einsicht in weitere Unterlagen hatten, wird in den Kapiteln zu den Expertenberichten darauf verwiesen.

NTB 14-02 Dossier II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02 Dossier III: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

- NTB 14-02 Dossier VIII: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier VIII: Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NAB 10-39: Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NAB 13-09: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-40: Gravity Data in Northern Switzerland and Southern Germany, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-80: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-17: Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbons: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-57: Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-58: Reflexionsseismische Analyse der 'Braunen Doggers', Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-74: Vergleich der 2D-seismischen Linien mit dem geologischen 3D-Modell Wellenberg 2014, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- Nagra 2012: „Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- NAB 13-57: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: Survey-Design-Studie, Gebiet Jura Ost, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-58: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: Survey-Design-Studie, Gebiet Jura-Südfuss, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-59: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: Survey-Design-Studie, Gebiet Nördlich Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-60: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: Survey-Design-Studie, Gebiet Südranden, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-40: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: 3d-Ray-Tracing Studie, Gebiet Jura Südfuss, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

- NAB 14-41: Vorbereitung 3D-Seismik für Etappe 3: Studie des Überdeckungsrisikos, Gebiet Jura Südfuss. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-42: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: 3d-Ray-Tracing Studie, Gebiet Nördlich Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-43: Vorbereitung 3D-Seismik für Etappe 3: Studie des Überdeckungsrisikos, Gebiet Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-44: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: 3d-Ray-Tracing Studie, Gebiet Südranden, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-45: Vorbereitung 3D-Seismik für Etappe 3: Studie des Überdeckungsrisikos, Gebiet Südranden. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-46: Vorbereitung 3d-Seismik Für Etappe 3: 3d-Ray-Tracing Studie, Gebiet Jura Ost, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-47: Vorbereitung 3D-Seismik für Etappe 3: Studie des Überdeckungsrisikos, Gebiet Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

1.5 Stellungnahme des ENSI zur 2D-Seismik der Nagra in Etappe 2 SGT

Das Kapitel 2.4 des sicherheitstechnischen Gutachtens (ENSI 33/540) zum Vorschlag der Nagra der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete beinhaltet eine Beurteilung des ENSI zur 2D-Seismik der Nagra in Etappe 2 SGT. Dieses Kapitel umfasst eine ausführlichere Stellungnahme dieser Beurteilung durch das ENSI. Die Einleitung und diese Stellungnahme (Kapitel 1) stellen die Schlussfolgerungen des ENSI aufgrund aller vorliegenden Unterlagen der Nagra und der vorliegenden Expertenberichte (Kapitel 2 bis 6) dar. Die Schlussfolgerung des ENSI entspricht nicht per se der Meinung der am Review beteiligten Experten. Entsprechend bilden die in diesem Dokument vorliegenden Expertenberichte die Meinung der jeweiligen Experten ab.

Durch die Ergebnisse der 2D-Seismik und deren Interpretation können geologisch-tektonische Elemente identifiziert werden und die Tiefenlage der stratigraphischen Horizonte und deren Ungewissheiten abgeschätzt werden. Diese bilden eine wichtige Grundlage für die Abgrenzung der Lagerperimeter (ENSI 33/540, Kapitel 5.1), die lokale Überarbeitung der geologischen Schichtmodelle in den Standortgebieten (ENSI 33/540, Kapitel 2.6) und die Beurteilung der geologischen Situation in der Nordschweiz (ENSI 33/540, Kapitel 6.1).

Angaben der Nagra

Der regionale 2D-Seismikdatensatz in der Nordschweiz stellt einen wesentlichen Informations-eckpfeiler dar. Der bereits in Etappe 1 SGT zur Verfügung stehende Datensatz wurde im Rahmen der Etappe 2 SGT vollständig reprozessiert (68 Seismikprofile mit einer Gesamtlänge von rund 1300 km) und mit dem Datensatz der 2D-Seismikkampagne 2011/12 (20 Seismikprofile mit einer Gesamtlänge von ca. 300 km) ergänzt, wobei der Datensatz homogenisiert wurde, um die Vergleichbarkeit der Daten zwischen verschiedenen Kampagnen zu verbessern. Mit dem vorliegenden Datensatz erfolgt die Verifikation und Präzisierung von regionalen tektonischen Elementen und es wird die Grundlage für eine lokale Überarbeitung der Schichtmodelle in den Standortgebieten gelegt. Im Standortgebiet Wellenberg wurde testweise eines der regionalen seismischen

Profile neu reprozessiert, wobei das Reflexionsbild aufgrund der komplexen geologischen Struktur des Untergrunds und des schlecht bestimmbar Geschwindigkeitsmodells insgesamt keine verlässlichere Abbildung von geologischen Strukturen lieferte. Deshalb wurde auf eine Neubearbeitung aller seismischen Linien zum Wellenberg verzichtet (NTB 14-02 Dossier II).

Die Hauptziele der 2D-Seismik sind (1) die Verifikation und Präzisierung des Verlaufs von regionalen Störungszonen, (2) die Gewinnung von Informationen zu anordnungsbestimmenden Störungen innerhalb der Standortgebiete und (3) die Vertiefung des regionalen kinematisch-tektonischen Verständnisses um die HAA-Gebiete Bözberg und Nördlich Lägern im Hinblick auf Etappe 3 SGT. Der Input zu Ungewissheiten in Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine, die Verifikation von Verlauf und Tiefe der wichtigsten quartären Felsrinnen, die Identifikation von Faziesübergängen (z.B. im „Braunen Dogger“), die Verbesserung des Verständnisses des Permokarbondrogens und Feldparameter-tests für zukünftige 3D-Seismik-Kampagnen sind als Nebenziele formuliert.

Im Rahmen der Reprozessierung wurde das seismische Abbild durch die Überarbeitung der statischen Korrekturen, der Mute-Funktion, der Neuanwendung moderner Stapelverfahren (CRS-Stapelung) sowie der detaillierteren Zeitmigration der Profile in der Pre-Stack-Domäne verbessert. Anschliessend wurde das regionale seismische Geschwindigkeitsmodell überarbeitet, auf dessen Basis eine Pre-Stack-Tiefenmigration der 2D-Profile durchgeführt wurde (Nagra 2012a, NAB 13-10 und NAB 14-34). In der Nordschweiz hat dieses Verfahren mit zur Verbesserung des seismischen Abbilds der Profile beigetragen (Nagra 2012a).

Die Datenverarbeitung der 2D-Seismik 2011/12 wurde weitgehend analog zur Bearbeitungssequenz der Reprozessierung durchgeführt (NAB 13-09 und NAB 13-10). Die neuen Messungen ergaben seismische Profile mit in den allermeisten Fällen sehr guter Abbildungsqualität (NTB 14-02 Dossier II, Fig. 2.2-2) und führten zu einer wesentlichen Verdichtung der seismischen Datengrundlage in den Standortgebieten der Nordschweiz (NTB 14-02 Dossier II, Beil. 2-1). Insgesamt wurde dadurch die Vergleichbarkeit zwischen diesen Standortgebieten und dem bereits mit 3D-Seismik überdeckten Gebiet Zürich Nordost verbessert (NTB 14-02 Dossier II).

Am Wellenberg erscheint das Reflexionsbild zwar nach der Tiefenbearbeitung wesentlich durchgängiger und strukturierter, aufgrund der komplexen geologischen Struktur des Untergrunds und des schlecht bestimmbar Geschwindigkeitsmodells liefert die CRS-Bearbeitung hier aber insgesamt keine verlässlichere Abbildung von geologischen Strukturen.

Als Ergebnis der seismischen Datenverarbeitung (Nagra 2012a, NAB 13-09, NAB 13-10, NAB 13-80 und NAB 14-34) liegen für die seismische Interpretation verschiedene Versionen der 2D-Seismikprofile vor, wobei ein einheitliches Bezugsniveau und eine einheitliche Phasenlage für die neuen seismischen Zeit- und Tiefenprofile verwendet wurden. Für die reprozessierten Profile und für die Profile der 2D-Seismik 2011/12 liegen jeweils die Pre-Stack-Zeitmigration (PSTM), die Pre-Stack-Tiefenmigration (PSDM) und die Tiefe-Zeit-Konversion (DTconv) vor.

Bei der Berechnung der Pre-Stack-Tiefenmigration (PSDM, NAB 14-34, Kapitel 2.3) der reprozessierten Profile wurde ein iteratives tomographisches Verfahren eingesetzt. Für dieses Modell (PSDM-Geschwindigkeitsmodell), das für die reprozessierten Profile entwickelt wurde, sind die Korrelationen mit den Bohrungen und Kreuzungen der PSDM-Stapelung nicht mehr zwingend gewährleistet. Deshalb wurde am Ende der Reprozessierung ein sogenanntes Depthing durchgeführt, bei dem diese Unstimmigkeiten zwischen den in Tiefe interpretierten Horizonten an Linienkreuzungen und an Bohrungen durch ein Editieren des PSDM-Modells korrigiert wurden (Depthing-Modell). Anschliessend wurde das Depthing-Modell für die im Rahmen von Etappe 2

SGT neu aufgenommen Profile ausgehend von Kreuzungspunkten mit reprozessierten Profilen mittels einer profilbezogenen Interpolation abgeleitet.

Die Konstruktion der lokalen Tiefenkarten der ausgewählten geologischen Schichtgrenzen erfolgt ausgehend von der Interpretation der seismischen Marker- und Hilfshorizonte (Top Lias (entspricht Basis Opalinuston), Basis Malm und der modellierten seismischen Hilfshorizonte Near-Top Opalinuston und Near-Top Effinger Schichten) entlang des 2D-Seismiknetzes. Im Standortgebiet Zürich Nordost wurden zusätzlich noch die Ergebnisse der 3D-Seismik berücksichtigt. Aus den nicht geglätteten Tiefenkarten werden innerhalb der Standortgebiete Karten der vertikalen Mächtigkeiten für die Wirtgesteine errechnet. Die erstellten Tiefen- und Mächtigkeitskarten wurden anschliessend durch eine Mittelwertberechnung geglättet.

Die Interpretation des 2D- und 3D-Seismik-Datensatzes bildet die Grundlage für die Abgrenzung regionaler geologischer Elemente (NTB 14-02 Dossier II). Die resultierenden seismischen Markerhorizonte in Tiefe (NAB 14-34) bilden eine wichtige Grundlage für die geologischen Profilschnitte (NTB14-02, Dossier II, Beil. 4-2 bis 4-9 und NAB 14-105) als auch für die Tiefen- und Mächtigkeitskarten der Wirtgesteine in den Standortgebieten inklusive einer Abschätzung der diesbezüglichen Ungewissheiten (NTB14-02, Dossier II, Kapitel 5 und Anhang A1 bis A4).

Die 'regionalen tektonischen Elemente' (NTB14-02 Dossier II, Kapitel 4.4) werden von dem gleichnamigen Indikator berücksichtigt und sind bei der Abgrenzung der Lagerperimeter von fundamentaler Bedeutung (Nagra 2014). Die lokalen strukturgeologischen Charakteristika der Standortgebiete (NTB14-02 Dossier II, Kapitel 4.5), insbesondere die Bedeutung von potenziell anordnungsbestimmenden tektonischen Elementen wurden bei der Bewertung des Indikators 'Platzangebot untertags' berücksichtigt (NTB 14-01). Wenn es sich bei letzteren um anordnungsbestimmende tektonische Elemente handelt, haben sie Auswirkungen auf die Anordnung von Lagerkammern innerhalb der Lagerperimeter und beeinflussen so im negativen Sinne die Flexibilität bei der Auslegung eines geologischen Tiefenlagers. Diesbezüglich liefert der Bericht NAB 14-88 nützliche Informationen, weil er basierend auf effektiven Beobachtungen aufzeigt, wie die verschiedenen Lagerperimeter zergliedert sein können und dazu unter Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten statistische Informationen abgibt. Deshalb wird die Bewertung des Platzangebots zusätzlich auch mit den Informationen in NAB 14-88 geprüft.

Im Allgemeinen definiert die Nagra zu meidende tektonische Zonen (zmtZ) als Gebiete, welche im Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen liegen und mehrheitlich mit dem Nordschweizer Permokarbondrog assoziiert sind, sowie Antiklinalstrukturen im Nahbereich des Faltenjuras (NTB 14-02 Dossier II, Kapitel 4.4.2). Die Beweggründe, solche Zonen zu meiden, fundieren auf geodynamischen Überlegungen sowie auf bisherigen seismischen Erkenntnissen in der Nordschweiz, die gezeigt haben, dass bei der Entwicklung des Falten- und Überschiebungsgürtels des Juragebirges die Randbruchzonen des Permokarbondroges als Rampen zur Nukleation neuer Überschiebungen gewirkt haben oder zum Teil auch reaktiviert wurden. Neben diesen geodynamischen Aspekten ist im Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen auch mit ungünstigen strukturgeologischen Charakteristika, z. B. einer erhöhten Trennflächendichte zu rechnen. Betroffen von derartigen zu meidenden tektonischen Zonen sind neben dem südlichen Teil des Standortgebietes Zürich Nordost auch der nördliche Teil des Standortgebietes Nördlich Lägern sowie der äusserste Südostabschnitt des Standortgebietes Jura Ost.

Antiklinalstrukturen stehen im Untersuchungsgebiet in der Regel in Zusammenhang mit der Entstehung des Faltenjura-Überschiebungsgürtels. Die Hauptphase der Jura-Faltung war gemäss dem derzeitigen Wissensstand vor etwa 4 Millionen Jahren abgeschlossen, schritt aber lokal bis ins Pleistozän fort und hält möglicherweise in modifizierter Art und Weise mit sehr geringen Deformationsraten bis heute an (NTB 14-02). Scharnierbereiche von Antiklinalen zeichnen sich durch das gehäufte Auftreten von extensionalen Kluftsystemen aus. Aus diesen Gründen drängt sich die Ausweisung solcher Antiklinalstrukturen als zu meidende tektonische Zonen zur Optimierung von Lagerperimetern innerhalb der geologischen Standortgebiete sowohl aus geodynamischer wie auch strukturgeologischer Sicht auf. Die Abgrenzung dieser zu meidenden tektonischen Zonen basiert auf der Identifikation von antiklinalen Aufwölbungen des mesozoisch-känozoischen Sedimentstapels. In der Regel steht eine solche in Zusammenhang mit einer deutlichen Verdickung der Triasabfolge und einer entsprechenden Aufwölbung des seismischen Markerhorizonts Top Muschelkalk. Von dieser Art zu meidende tektonische Zone ist ausschliesslich das Standortgebiet Jura-Südfuss betroffen.

Beurteilung des ENSI

1.5.1 Datengrundlage und Vorgehen

Die Ergebnisse der 2D-Seismik und deren Interpretation vor allem im Hinblick auf die Identifizierung der geologisch-tektonischen Elemente, der Tiefenlage der Horizonte sowie der dazugehörigen Ungewissheiten sind für die Abgrenzung der Lagerperimeter aus Sicht des ENSI von entscheidender Wichtigkeit. Die Ergebnisse bilden ausserdem eine wichtige Grundlage für die geologisch-tektonische Interpretation der Nordschweiz.

Die in den Jahren 2011/2012 neu akquirierten und die älteren reprozessierten 2D-Seismikdaten und deren geologische Interpretation stellen nach Ansicht des ENSI eine umfassende Datengrundlage für Etappe 2 SGT dar. Dessen ausführliche, jedoch zum Teil schwierig nachvollziehbare Dokumentation sowie die Fachsitzungen zwischen der Nagra und dem ENSI-Review-Team erlaubten das Nachvollziehen und die Überprüfung des vorliegenden Datensatzes.

Nach Ansicht des ENSI entsprechen die durchgeführten Arbeiten sowie die dabei angewandten Techniken grundsätzlich dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik. Der im Rahmen der Seismik-Bearbeitung in Tiefe gewählte Ansatz entspricht allerdings nicht den gewöhnlich in der Industrie eingesetzten Arbeitsabläufen. Nach Einschätzung der Experten können die aus dem gewählten Vorgehen resultierenden Tiefenangaben jedoch als Best-Case-Szenario bzw. Referenziefen betrachtet werden. Bezüglich der Bestimmung der Ungewissheiten kommen das ENSI und seine Experten zum Schluss, dass bis auf die Abschätzung der Unsicherheiten in der Tiefenlage der Horizonte die Arbeiten dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

Die zugänglichen Informationen, die regelmässig dokumentierten Arbeitstreffen und die enge Abstimmung zwischen der Nagra und deren Kontraktoren, die Qualitätskontrollen im Feld und beim Processing belegen eine hohe Sorgfalt und Qualitätssicherung bei der Erarbeitung des 2D-Seismik-Datensatzes.

Das ENSI hält fest, dass die neuen und älteren 2D-seismischen Daten und deren geologische Interpretation eine für Etappe 2 SGT geeignete Datengrundlage zur Identifizierung der geologisch-tektonischen Elemente und der Tiefenlage der Horizonte darstellen.

Das ENSI erachtet die in Forderung 9 aus der Stellungnahme ENSI 33/115 zum Untersuchungsprogramm NTB 10-01 der Nagra formulierte Abklärung hinsichtlich der möglichen Fortsetzung der Born-Engelberg-Antiklinale nach Osten mit dem vorliegenden 2D-Seismik-Datensatz als erfüllt.

Die Angaben zur Mächtigkeit der Wirtgesteine, welche für die Bewertung der Standortgebiete wichtig sind, basieren hauptsächlich auf Bohrungen (ENSI 33/540, Kapitel 2.6). Das ENSI kann das Vorgehen der Nagra nachvollziehen, wobei nach Ansicht des ENSI wichtig ist, dass die Abschätzungen bzgl. der Unsicherheiten in den Angaben zur Mächtigkeit aus der 2D-Seismik bei der Einengung berücksichtigt werden.

Für die Beurteilung der 2D-Seismik hinsichtlich des regionalen kinematisch-tektonischen Verständnisses um die HAA-Gebiete Jura Ost und Nördlich Lägern, der Verifikation von Verlauf und Tiefe der wichtigsten quartären Felsrinnen (ENSI 33/540, Kapitel 2.5.3), der Identifikation von Faziesübergängen, z.B. im 'Braunen Dogger' (ENSI 33/540, Kapitel 3.1.2), der Verbesserung des Verständnisses des Permokarbondrogens und Feldparametertests für zukünftige 3D-Seismik-Kampagnen wird auf Kapitel 8 des Gutachtens (ENSI 33/540) verwiesen.

1.5.2 Seismische Datenverarbeitung

Das ENSI und seine Experten halten fest, dass die seismische Datenverarbeitung der alten wie auch der neuen Daten mittels etablierter und standardisierter Verfahren erfolgte. Die Ergebnisse zeigen ein gegenüber Etappe 1 SGT deutlich verbessertes seismisches Abbild der regionalen tektonischen Elemente im Untersuchungsgebiet. Dazu tragen v. a. die sorgfältige Bearbeitung der statischen Korrekturen, die Rauschunterdrückung und die Anwendung unterschiedlicher Stapelungs- und Migrationsmethoden bei. Die dabei zur Anwendung gekommene neue, noch nicht allgemein etablierte CRS-Stapelung (Common-Reflection-Surface) ist hinsichtlich der Zielsetzung, der Reduktion des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses, sinnvoll. Bei der CRS-Technologie muss auf eine ausgewogene Anwendung zwischen seismischer Reflektorkontinuität einerseits und Störungsdetektion (also fehlender Reflektorkontinuität) andererseits geachtet werden. Gemäss den Experten des ENSI zeigen die vorliegenden Resultate, dass die Störungsdetektion durch die CRS-Stapelung nicht negativ beeinflusst wurde.

Die 2D-Seismik in Zeit (Darstellung der Profile mit den Zweiweglaufzeiten) bietet bereits wertvolle Informationen zur Kontinuität von Reflektoren sowie zur lateralen Lage und Frequenz von Störungen in den Standortgebieten. Um die Tiefenlage der Reflektoren und die Geometrie der Störungen zu erhalten, wird ein seismisches Abbild in der Tiefendomäne erstellt. Der wichtigste Schritt bei der Datenverarbeitung in Tiefe ist die Erstellung eines Geschwindigkeitsmodells. Die Qualität des seismischen Abbilds in der Tiefe ist abhängig von der Qualität dieses Geschwindigkeitsmodells. Dessen Bestimmung erfolgt hier in einem zweistufigen Vorgehen: (1) Ermittlung eines Geschwindigkeitsfeldes auf Basis der älteren Seismikprofile mittels „pre-stack-depth-migration“ (mittels Kirchhoff-Methode); (2) Anpassung des ermittelten Geschwindigkeitsfeldes an die Bohrungsdaten. Das ENSI und seine Experten kommen zum Schluss, dass die Wahl der Migrationsmethode (Kirchhoff) eine für die Zielsetzung robuste und stabile Qualität des Abbilds liefert.

Die Entscheidung, dieses Geschwindigkeitsfeld nur über die älteren Seismikprofile zu ermitteln führt nach Ansicht der Experten nicht zu einer Verschlechterung des seismischen Abbildes, wirkt sich jedoch auf die Bestimmung der Unsicherheiten aus. Das zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes verwendete Startmodell, hergeleitet aus einem regionalen 3D-Geschwindigkeitsmodell, gewährleistet eine Anbindung an die Bohrungsdaten. Hier hätte ein typischerweise ermitteltes Startmodell (basierend auf den Stapelgeschwindigkeiten der Zeitmigration) eine ausschliesslich Seismikdaten-basierte Lösung geliefert.

Für die neuen Profile werden anschliessend mittels dem sogenannten Depthing-Verfahren die Unstimmigkeiten bzgl. der Tiefe an Bohrungen und Linienkreuzungen durch manuelle Anpassungen am Geschwindigkeitsmodell korrigiert. Die Experten des ENSI halten fest, dass es sich beim Depthing um eine ungewöhnliche Vorgehensweise im Rahmen einer seismischen Datenverarbeitung handelt (Kapitel 2 und 3). Gemäss Aussagen der Experten scheint das Vorgehen in der Praxis nicht üblich zu sein, doch scheinen die Resultate trotz allem belastbar zu sein. In den Fachgesprächen zwischen der Nagra, dem ENSI und seinen Experten wurde das detaillierte Vorgehen bei der Datenverarbeitung nachvollzogen. Basierend auf den dargestellten Migrationsergebnissen kommen die Experten des ENSI zum Schluss, dass die gleichbleibende Qualität darauf hindeutet, dass die Anwendung dieses Depthing-Verfahrens zu keinem nachteiligen Ergebnis führt. Das resultierende Tiefenmodell kann somit als ein Best-Case-Szenario für die Tiefenwandlung betrachtet werden.

Die vorliegende 2D-Seismik wird an den Bohrungen aufgehängt, um deren exakte Teufeninformation zu nutzen. Im Umfeld dieser Bohrstandorte ist die Unsicherheit sehr klein. Die Unsicherheiten in der Tiefenlage der interpretierten Horizonte stammen von Unsicherheiten der interpretierten Laufzeitlage und Unsicherheiten bzgl. des Geschwindigkeitsmodells für die Tiefenkonversion. Letztere werden durch ad-hoc Annahmen (von 5% möglicher Geschwindigkeitsvariation) modelliert. Aufgrund der Rückmeldungen seiner Experten kommt das ENSI zum Schluss, dass die Erarbeitung der Unsicherheiten in der Teufeninformation der Horizonte einer sehr einfachen Formulierung folgt und die tatsächlichen Unsicherheiten nur beschränkt wiedergibt. Alternative Ansätze zur Quantifizierung der Unsicherheiten werden von den Experten ausführlich diskutiert (Kapitel 2 und 3). Für das ENSI stellen sich im vorliegenden Fall zwei Fragen: (1) Sind die ausgewiesenen Fehlerbandbreiten abdeckend? (2) Hat die zu konservative Abschätzung der Fehlerbandbreiten einen Einfluss auf den Einengungsentscheid? Bezüglich der ersten Fragestellung kommen das ENSI und seine Experten zur Einschätzung, dass aufgrund von Erfahrungswerten, von Vergleichen mit Bohrprognosen und tatsächlich erbohrten Teufen sowie basierend auf der Qualität der 2D-Seismik (Akquisition, Datenverarbeitung), die ausgewiesenen Fehlerbandbreiten sehr konservativ erscheinen und die tatsächlichen Unsicherheiten mit hoher Wahrscheinlichkeit abdecken. Hinsichtlich der zweiten Fragestellung verweist das ENSI an dieser Stelle auf die Robustheitsprüfung der Resultate, bei welcher die mittels der 2D-Seismik ausgewiesenen Unsicherheiten in der Tiefenlage als alternative Fälle in die bewertenden Vergleiche eingehen. Dabei berücksichtigt das ENSI die sehr konservative Betrachtung. Nach Einschätzung des ENSI kann das resultierende Tiefenmodell als Referenzwert für die Tiefenlage der Markerhorizonte angesehen werden und allfällige Fehler in der Tiefenlage folgen zu einem gewissen Teil einer Normalverteilung (Kapitel 3.3). Folglich ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass die Tiefenlage den unteren oder oberen Eckwert erreicht.

1.5.3 Interpretation der seismischen Daten

Die Interpretation der seismischen Daten erfolgt hinsichtlich der regionalen tektonischen Elemente (regionale Störungszonen und zu meidende tektonische Zonen) zur lateralen Abgrenzung der Lagerperimeter und der Tiefenlage der lithologischen Horizonte zur Abschätzung der maximalen (Bautechnik) und minimalen (Erosion) Tiefenlage. Zusätzlich liefert sie Informationen hinsichtlich der geologisch-tektonischen Interpretation der Standortgebiete und der anordnungsbestimmenden Störungen. Das ENSI erachtet es als zielführend, dass die Mächtigkeiten hauptsächlich auf belastbare Bohrungs- und Aufschlussdaten abzustützen (ENSI 33/540, Kapitel 2.5).

Das ENSI kommt zum Schluss, dass die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien von der Nagra mit hoher Qualität durchgeführt wurde. Die von der Nagra angewandte Klassierung der Qualität von Horizonten und Störungen erfolgte im Rahmen der Bearbeitung in Zeit. In der Dokumentation bei der Bearbeitung in Tiefe wurde auf diejenige in Zeit verwiesen, jedoch nicht explizit in der Dokumentation ausgewiesen, was für die Begutachtung irreführend war. Nach Ansicht des ENSI hat die Nagra unterschiedlichen Interpretationsvarianten aufgrund von alternativen Modellen oder entstanden durch die Datenverarbeitung grundsätzlich genügend Beachtung geschenkt. Einzelne, für den Einengungsschritt relevante Ausnahmen werden noch explizit thematisiert (Kapitel 1.5.5).

Aus Sicht des ENSI erfüllt die vorliegende Interpretation der seismischen Daten eine gute Grundlage für den Einengungsentscheid, nutzt alle verfügbaren Daten (Aufschlüsse, Bohrungen, Gravimetrie) und erfolgt nach Stand von Wissenschaft und Technik. Die von der Nagra vorgelegten regionalen Störungen rund um die Standortgebiete der Nordschweiz decken mindestens das seitens swisstopo erhobene Störungsinventar (ENSI 33/470) ab. Allfällige Limitierungen bei der Identifizierung von Störungen ergeben sich aus der Natur der 2D-Seismik und nicht aus der Herleitung der Resultate. Entsprechende Beeinträchtigungen durch diese Limitierungen werden in Hinblick auf den Einengungsvorschlag vertieft thematisiert (Kapitel 1.5.5). In den Bereichen der Lagerperimeter, in denen die Schichten horizontal oder leicht geneigt vorliegen, erweisen sich die Ergebnisse der Interpretation der 2D-Seismik als robust.

1.5.4 Tiefenlage und Mächtigkeit

Das ENSI unterscheidet bei der Beurteilung der Mächtigkeiten zwischen Angaben aus Bohrdaten, Angaben aus seismischen Profilen und Interpolationen zwischen den seismischen Profilen. Während die Angaben aus den Bohrungen zur Tiefenlage eine Genauigkeit im Meter-Bereich aufweisen, sind die Angaben zur Genauigkeit entlang der seismischen Profile als Erwartungswert mit eher konservativen Abschätzungen hinsichtlich der Ungewissheiten für die Tiefenlage zu verstehen (Kapitel 3). Das ENSI erachtet es daher als zielführend, die Angaben zu den Mächtigkeiten (insbesondere für die Wirt- und Rahmengesteine) hauptsächlich auf belastbare Bohrungs- und Aufschlussdaten abzustützen.

Nach Einschätzung des ENSI basieren die zwischen den seismischen Profilen berechneten Tiefenlagen mit Ausnahme des Standortgebiets Zürich Nordost, in welchem die bereits vorhandene 3D-Seismik berücksichtigt werden konnte, ausschliesslich auf mathematischen Interpolationen. Das ENSI kommt zum Schluss, dass die Verwendung des seismisch schlecht abbildbaren Horizonts am Übergang von Opalinuston und ‚Braunem Dogger‘ (‚near Top Opalinuston‘) wegen der grossen Unschärfe eine Abschätzung der Mächtigkeit des Opalinustons gegenüber den Mächtigkeitsinformationen aus den Bohrungen keinen Mehrwert bietet. Für die Abschätzung der Mächtigkeiten der anderen Wirtgesteine bzw. der Rahmengesteine in der Nordschweiz sind die Angaben aus den Mächtigkeitskarten grundsätzlich ebenfalls mit Ungewissheiten verbunden. Daher zieht das ENSI für seine Bewertung des Indikators 5 „Mächtigkeit“ in den Standortgebieten der Nordschweiz nur Bohrlochdaten heran.

Nach Ansicht des ENSI zeigen die modellierten Tiefenkarten und die daraus hergeleiteten geglätteten Mächtigkeitskarten ((NTB 14-02 Dossier II, Beil. A1-12, A1-13, A2-9, A2-10, A3-9 und A4-10, A4-11) eine räumliche Auflösung, welche sich aus der Dichte der seismischen Linien und der Güte des Geschwindigkeitsmodells nicht in dieser Genauigkeit begründen lässt. Entsprechende berechnete Tiefenlagen zwischen den seismischen Profilen beruhen ausschliesslich auf

mathematischen Interpolationen und sollten deshalb nicht direkt für die Bewertung des Indikators „Mächtigkeit“ herangezogen werden.

Die von der Nagra gewählte Ableitung der Mächtigkeiten des Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg anhand des 3D-Modells, welches auf Basis von vorhandenen Bohrinformationen sowie geologischen Schichtausbissen modelliert wurde, wird seitens ENSI für Etappe 2 SGT als zielführend angesehen.

1.5.5 Störungen

1.5.5.1 Regionale Störungszonen

Das ENSI und seine Experten kommen zum Schluss, dass die Lokationen und die Verläufe der regionalen Störungszonen mit der vorliegenden 2D-Seismik vorständig erfasst wurden.

1.5.5.2 Zu meidende tektonische Zonen (zmtZ)

Das ENSI sieht es als sicherheitsgerichtet an, neben den klar ersichtlichen und kartierbaren regionalen Störungszonen, tektonischen Elementen im Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen, insbesondere den Randbruchzonen des Nordschweizer Permokarbondrogos auszuweichen. Bezüglich der Eingrenzung der Lagerperimeter haben die zmtZ in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern die grössten Auswirkungen (NTB 14-02 Dossier II). Das ENSI kann die südliche Abgrenzung des Lagerperimeters im Standortgebiet Zürich Nordost aufgrund der vorliegenden Daten aus der Gravimetrie und der 2D- und 3D-Seismik nachvollziehen.

Für die Einengung ist es wichtig, dass die Ergebnisse auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten Gültigkeit haben (ENSI 33/154). Bei der Beurteilung der nördlichen zu meidenden tektonischen Zone in Nördlich Lägern ist deshalb klar zwischen belastbaren Daten und konzeptuellen Überlegungen zu unterscheiden. Das ENSI vermutet wie die Nagra, dass der Bereich aufgrund der langsam gegen Norden ansteigenden Schichtpakete zur Siglistorf-Antiklinale vermutlich stärker tektonisiert ist. Nach Ansicht des ENSI kann jedoch die zu meidende tektonische Zone im Norden des Standortgebiets aufgrund der vorliegenden Daten weder exakt abgegrenzt, noch der Grad der tektonischen Zergliederung (und somit die Bedeutung für die geologische Langzeitstabilität) belastbar belegt werden. Entsprechend kommt das ENSI zum Schluss, dass die Abgrenzung der zu meidenden tektonischen Zone durch die Nagra eine mögliche, jedoch keine zwingende Abgrenzung darstellt.

Mit den Befunden der Schlüsselbohrungen Riniken und Weiach-1 und -2, wo die Sedimentabfolge des Permokarbons erbohrt wurde, den Ergebnissen der Reflexionsseismik (ausgeprägte Reflexionsbündel mit hoher Amplitude, welche mit Kohlevorkommen des Oberkarbons (Stephanien) der Bohrungen Weiach-1 und -2 korreliert werden können) und den Gravimetriedaten (negative Schwereanomalie) ist die Existenz des Nordschweizer Permokarbondrogos im Standortgebiet Nördlich Lägern unbestritten. Während sich die Interpretation der Reflexionsseismik im Deckgebirge streng an lithostratigraphisch definierten und in Bohrungen kalibrierbaren Markerhorizonten orientieren kann, fehlen solche im Grundgebirge bzw. Permokarbondrog weitgehend. Die Interpretation der Seismik erfolgt hier deshalb vor allem mit Hilfe der seismischen Fazies, charakteristischer Diskordanzen zwischen den einzelnen Reflexionspaketen oder erkennbarer Störungszonen. Aufgrund der Seismik-Ergebnisse der 2011/2012-Messkampagne (NAB 13-10) und einer Detailauswertung der Schwere-Daten (NAB 13-40) hat die Nagra die in Etappe 1 SGT dargestellte Karte des Nordschweizer Permokarbondrogos überarbeitet und aktualisiert (NAB 14-17).

Ausgehend von den stratigraphischen Befunden der Bohrkerne Riniken und Weiach unterscheidet die Nagra qualitativ die drei seismischen Faziesbereiche Obere Trogfüllung, Mittlere Trogfüllung und Untere Trogfüllung, die mehr oder weniger dem Oberrotliegenden, dem Unterrotliegenden und dem Oberkarbon (Stephanien) entsprechen. Für das Standortgebiet Nördlich Lägern können gemäss Nagra (NAB 14-17) folgende tektonische Charakteristika des Nordschweizer Permokarbondrogens erfasst werden:

- Der hier als Ost-Trog bezeichnete Teil des Permokarbondrogens weist eine annähernd spiegelbildliche Halbgraben-Struktur auf. Gut abgesichert ist die nördlich gelegene, mässig steil einfallende Trogflanke, die von mehreren Bruchsystemen zerschert ist. Der Südrand des zentralen Troges wird unter dem Baden-Irchel-Herdern-Lineament vermutet, was aber weit weniger gut belegt ist.
- Mächtigkeitsschwankungen der mesozoischen und känozoischen Sedimentabfolge oberhalb der Randzonen des Permokarbondrogens sowie ausgeprägte Flexuren dieser Abfolge in diesem Bereich deuten mehrfache post-paläozoische Reaktivierungen an. Gesichert sind extensionale Bewegungen, die zum Teil auch zur Ausbildung von in der 2D-Seismik erkennbaren Abschiebungen in den Decksedimenten führten.
- Im Gegensatz dazu erscheint das Deckgebirge über den zentralen Teilen des Permokarbondrogens meist sehr ruhig gelagert. In diesem Bereich fand offensichtlich keine post-paläozoische Reaktivierung von Störungen statt, die sich in der mesozoischen Schichtfolge bemerkbar machen.
- Während die intensive tektonische Zergliederung der nördlichen Trograndzone (Gebiet Weiach - Eglisau) als gesichert erscheint, kann die genaue Orientierung dieser Strukturen mit den vorhandenen Daten nicht final festgelegt werden. Nach Ansicht der Nagra wäre neben der hier bevorzugten Interpretation einer stark durch mehrere WNW-ESE streichende Störungen geprägte Randzone auch eine gradlinig NE-SW verlaufende Hauptstörung parallel zur Weiach-Rüdlinger-Flexur denkbar.

Aufgrund dieser Befunde kommt das ENSI bezüglich der Abgrenzung der zmtZ im Standortgebiet Nördlich Lägern im Bereich von Weiach zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Das ENSI teilt das Vorgehen der Nagra, den Randbruchzonen des Nordschweizer Permokarbondrogens wegen der Möglichkeit einer Reaktivierung mit den Lagerperimetern auszuweichen.
- Neben den Strukturen im Grundgebirge (Randzone Permokarbondrog) begründet die Nagra die Abgrenzung der zmtZ mit über Kilometer verfolgbaren Flexuren des mesozoisch-känozoischen Sedimentstapels und den an der Basis Mesozoikum kartierbaren Störungen. Die Aussagekraft der 2D-Seismik fokussiert hauptsächlich auf Strukturen im Mesozoikum als mögliche Folge einer Reaktivierung des Permokarbondrogens. Die von der Nagra aufgeführten Neigungskarten (NAB 17-01, Frage 28) sind nach Ansicht des ENSI und dessen Experten auf Datenbasis der 2D-Seismik in dieser Auflösung wegen der geringen Liniendichte nicht ausreichend belastbar (Kapitel 6). Die Abbildbarkeit der seismischen Horizonte ist im Standortgebiet Nördlich Lägern gemäss vorliegender Klassifizierung als „ausreichend definiert“ bzw. „schlecht definiert/konzeptionell“ einzustufen, was eine Einschätzung dieser Zone erschwert. Ob die verschlechterte Abbildbarkeit nur auf eine höhere Tektonisierung oder auf eine schlechtere Ankoppelung der Seismik in diesem Gebiet zurückzuführen ist, bleibt offen.

- Nach Ansicht des ENSI zeigen die 2D-Seismikprofile deutlich die Entwicklung der Siglistorf Antiklinale bzw. deren Aufschiebung nach Norden sowie deren Einflussbereich gegen Süden in das Standortgebiet. Dieser Einfluss ist durch ein geneigtes Schichtpaket charakterisiert, während gegen Süden weniger geneigte Schichtpakete folgen. Es zeigt sich ebenfalls, dass im Knickpunkt dieser beiden Zonen typischerweise Störungen erkennbar sind (Abbildung 1-2). Aus geologisch-tektonischen Überlegungen reicht der Einflussbereich der Siglistorf Antiklinale (Aufschiebung) damit jeweils bis zum Ansatz dieser geneigten Zone bzw. ist im Bereich der horizontal und ruhig gelagerten Schichtabfolge nicht mehr vorhanden.
- Es darf aufgrund von Beobachtungen aus der Bohrung Weiach und aus Analysen von Aufschlüssen in der näheren Umgebung (NAB 12-41) davon ausgegangen werden, dass die geneigten mesozoischen Schichtpakete nördlich dieser Knickpunkte eine gegenüber den südlichen, horizontal-liegenden Schichtpaketen höheren Grad an Tektonisierung aufweisen.

Aufgrund dieser Überlegungen beurteilt das ENSI die dargestellte Abgrenzung der zmtZ durch die Nagra als eine mögliche, jedoch nicht zwingende Abgrenzung. Es hält fest, dass in diesem speziellen Fall die Abgrenzung mit einer gewissen „Unschärfe“ verbunden ist, was einen direkten Einfluss auf die Abgrenzung des Lagerperimeters hat. Das ENSI ist ebenfalls der Meinung, dass dieser Bereich aufgrund der gegen Norden ansteigenden Schichtpakete zur Siglistorf-Antiklinale hin stärker geneigte Schichten besitzt und aufgrund der Rotation vermutlich stärker tektonisiert ist. Aufgrund der heutigen Datenlage kann die durch die Nagra als zmtZ definierte Zone per se nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der potentiell stärkeren Tektonisierung gegenüber dem horizontal gelagerten Schichtpaket weiter im Süden kann sie hinsichtlich bautechnischen und langzeitsicherheitstechnischen Aspekten Nachteile aufweisen. Eine 3D-seismische Erkundung in Etappe 3 SGT würde bezüglich des Grades und der räumlichen Ausdehnung der Tektonisierung in Nördlich Lägern erlauben, die vorhandenen Modellvorstellungen und Geometrie der zu meidenden tektonischen Zone zu präzisieren (analog dem Vorgehen in Zürich Nordost) und die vorhandenen Ungewissheiten zu reduzieren.

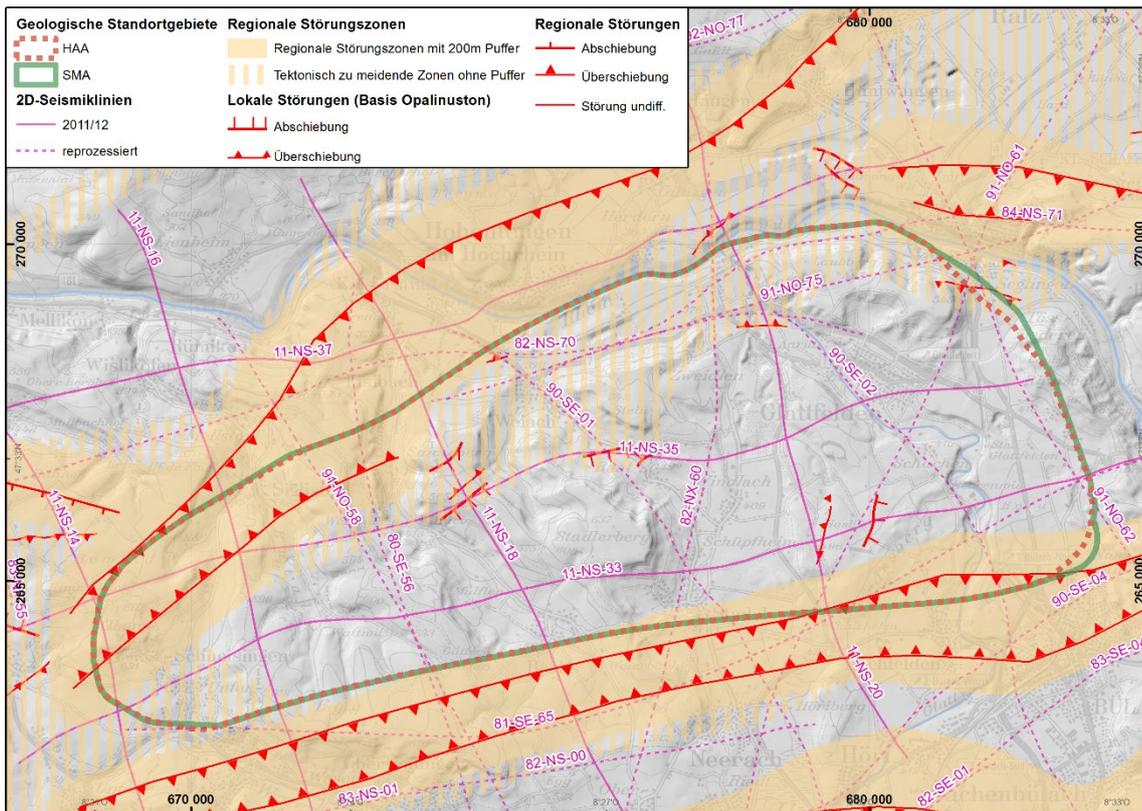


Abbildung 1-2: Übersicht über den Verlauf der regionalen Störungen (rote Linien mit Überschiebungssignatur) inklusive Sicherheitsabständen (orange) und dem Verlauf der 2D-Seismik Profile (ausgezogene und gestrichelte pinkige Linien) im Standortgebiet Nördlich Lägeren.

Die Meidung des Gebietes in der zentralen Zone der östlichen Fortsetzung der Born-Engelberg-Antiklinalstruktur in Standortgebiet Jura-Südfuss ist aus geologisch-tektonischer Sicht plausibel, obwohl die 2D-Seismik in diesem Gebiet zwischen den Hauptstörungsästen auch Teilgebiete mit ruhig gelagerten Schichtpaketen anzeigt. Da auf der Seismiklinie 12-NS-44 die Triasabfolge in diesem Teilbereich aber deutlich verdickt ist, muss analog zu den Beobachtungen in der Bohrung Schafisheim von einer deutlichen tektonischen Überprägung ausgegangen werden. Wegen des regionalen Charakters der Born-Engelberg-Struktur (und deren Lage im aktuellen Spannungsfeld um die Alpen) müssten in den Teilgebieten zudem Sicherheitsabstände zu den Haupt-Störungsästen definiert werden, was die Teilgebiete weiter verkleinert und ungeeignet macht. Die Abgrenzung der zmtZ ist für das ENSI deshalb nachvollziehbar. Das ENSI erachtet es als sicherheitstechnisch nachvollziehbar, dass im Standortgebiet Jura-Südfuss für die West-Fortsetzung der Schönenwerd-Eppenbergs-Antiklinale eine zu meidende tektonische Zone eingesetzt wird. Eine entsprechende West-Fortsetzung der Siggenthal-Antiklinale im Standortgebiet Jura Ost, obwohl deren vertikaler Versatz gegen Westen hin abnimmt, hält das ENSI ebenso für möglich. An der entsprechenden Stelle wird seitens Nagra jedoch keine zmtZ ausgewiesen. Aufgrund der grossen Platzreserven im Standortgebiet Jura Ost hat eine solche Verlängerung jedoch geringe Auswirkungen auf die Platzverhältnisse in diesem Standortgebiet.

1.5.5.3 Anordnungsbestimmende Störungen

Mit der regionalen 2D-Seismik liegen in Etappe 2 SGT ergänzende Informationen zu anordnungsbestimmenden Störungen vor. Diese erlauben aufgrund des Linienabstandes von ca. 2 km in der 2D-Seismik jedoch weder eine vollständige Erfassung der anordnungsbestimmenden Störungen

noch die Bestimmung von deren Verwerfungsrichtung oder Orientierung (Abbildung 1-2). Das ENSI begrüsst grundsätzlich den von der Nagra aufgrund dieser Einschränkung gewählten theoretischen Ansatz, die Frequenz der Störungen statistisch zu simulieren, hält indessen fest, dass die Ergebnisse für die Abschätzung des Platzbedarfs aus seiner Sicht nicht quantitativ belastbar sind (Kapitel 2). Diese Einschätzung wird durch alle Experten des ENSI bestätigt (Kapitel 2 bis 6). Das ENSI begründet diese Einschätzung hauptsächlich mit folgenden drei Punkten:

- Die Erfassung der anordnungsbestimmenden Störungen, welche als Eingangsgrösse für die Ermittlung der Frequenz der Störungen dient, ist unvollständig und abhängig von der Messanordnung der 2D-Seismik (Abstand und Lage der seismischen Profile);
- Das von der Nagra verwendete, das Standortgebiet einschliessende Polygon zur Abschätzung der Störungsfrequenz umfasst viele Störungen, welche mit regionalen und zu meidenden Störungen assoziiert werden, und ist deshalb für den in einer explizit ruhigen tektonischen Zone gewählten Lagerperimeter nicht repräsentativ und damit die resultierenden Störungsfrequenzen nicht belastbar.
- Eine quantitativ belastbare Bestimmung der Störungsfrequenz von anordnungsbestimmenden Störungen kann nur auf Basis derer vollständigen Erfassung mittels einer 3D-Seismik erfolgen.

Die mittels der 2D-Seismik erfassten anordnungsbestimmenden Störungen können allenfalls Hinweise auf Einschränkungen innerhalb des Lagerperimeters oder für die Grobcharakterisierung der geologischen Standortgebiete liefern, dürfen aus Sicht des ENSI jedoch nicht in quantitativer Weise in die Bewertung des Platzbedarfs einfließen.

1.5.6 Vergleichbarkeit von reprozessierter und neuer 2D-Seismik

Für einen fairen Einengungsprozess ist die Vergleichbarkeit der in den verschiedenen Standortgebieten akquirierten Daten von elementarer Wichtigkeit. Das ENSI erachtet den vorliegenden 2D-Seismik-Datensatz als geeignete Datenbasis, um die Standortgebiete anhand der Indikatoren unter dem Kriterium „Räumliche Ausdehnung“ zu vergleichen.

Das ENSI und seine Experten kommen zum Schluss, dass die Bearbeitung mittels etablierter, standardisierter Verfahren und die Verwendung neuerer Abbildungstechniken zu einem harmonisierten Datensatz geführt hat, der zudem bei Profilen älterer Generation eine erhebliche Abbildungsverbesserung aufweist. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, insbesondere die Informationen über den Horizont „Top Lias“ in den Nordschweizer Standortgebieten ist im Wesentlichen gegeben.

Den Vergleich des Standortgebiets ZNO, für welches bereits auf Erkenntnisse aus der 3D-Seismik im Rahmen des Entsorgungsnachweises (NTB 00-03) zurückgegriffen werden kann, mit den anderen Standortgebieten der Nordschweiz sieht das ENSI als belastbar an, da mit der 2D-Seismik die regionalen Störungselemente verlässlich identifiziert werden können und der Mehrwert durch die 3D-Seismik vor allem in der Identifizierung der zmtZ und der anordnungsbestimmenden Störungen liegt.

Aufgrund der Ergebnisse der Reprozessierung der 2D-Seismik-Daten im Standortgebiet Wellenberg kann das ENSI zudem den Entscheid der Nagra nachvollziehen, dass für die Einengung in Etappe 2 SGT eine Reprozessierung vorhandener seismischer Daten und eine Akquisition neuer 2D-Seismikdaten zu keinem Mehrwert führen würde.

1.6 Referenzen

- ENSI 33/070: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- ENSI 33/115: Stellungnahme zu NTB 10-01 «Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT», Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Stellungnahme, Brugg, 2011.
- ENSI 33/154: Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2013.
- ENSI 33/470: Review of the kinematic interpretation of the tectonic structures in northern Switzerland, swisstopo, Expertenbericht, Zürich, 2016.
- ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- NTB 00-03: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.
- NTB 10-01: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 – Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2010.
- NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-02 Dossier II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NAB 12-41: Characterisation of Cenozoic brittle deformation of potential geological siting regions for radioactive waste repositories in Northern Switzerland based on structural geological analysis of field outcrops, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.
- NAB 13-09: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-40: Gravity Data in Northern Switzerland and Southern Germany, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-80: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

- NAB 14-17: Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbons: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-99: Unterlagen zum Platzbedarf in den Lagerperimetern der geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-105: Regionale geologische Profilschnitte durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Fernschubdeformation im östlichen Faltenjura: Arbeitsbericht zu SGT-Etappe 2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2015.
- NAB 17-01: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2017.
- Nagra 2012: „Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.

2 Expertenbericht Dr. M. Riede

Bericht zur 2D-Seismik Bearbeitung im Rahmen der Etappe 2 des SGT

Expertenbericht zuhanden des
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in Brugg.

Dr. Matthias Riede

Norderstedt, den 3. September 2015

2.1 Zusammenfassung

Die Beurteilung der 2D-Seismik Datenbearbeitung wurde aus organisatorischen Gründen in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurde die Datenverarbeitung der Seismik in der Zeitdomäne (Kapitel 2.2) durchgeführt, danach erfolgte die Beurteilung der Datenverarbeitung in Tiefe (Kapitel 2.3). Zu beiden Teilaspekten wurden im Auftrag der ENSI Berichte erstellt und übergeben. Hinsichtlich der zentralen Fragen, die durch den Review Prozess geklärt werden sollten lässt sich zusammenfassend feststellen:

- Die von der Firma DMT Petrologic GmbH, mit Sitz in Hannover (Deutschland) durchgeführte seismische Datenverarbeitung der im Messgebiet zur Verfügung stehenden seismischen Datensätze, bestehend aus Profilen der 2011-2012er, 80iger und 90iger Nagra Seismik Kampagnen, sowie relevanter älterer Profile der Kohlenwasserstoffindustrie, liefert ein für die regional strukturgeologische Interpretation geeigneten Datensatz..
- Die Datenverarbeitung wurde, basierend auf den im Rahmen der Begutachtung zugänglichen Informationen technisch sorgfältig durchgeführt.
- Die vorliegende Dokumentation der Arbeiten durch DMT Petrologic GmbH ist ausreichend und erlaubt das Nachvollziehen und die Überprüfung der einzelnen Arbeitsschritte.
- Die Bearbeitung der Seismik in Zeit (Teilaspekt 1) mittels etablierter, standardisierter Verfahren und die Verwendung neuerer Abbildungstechniken, führt zu einem harmonisierten Datensatz, der zudem eine erhebliche Abbildungsverbesserung bei Profilen älterer Generationen aufweist. Aus der Sicht der geophysikalischen Datenverarbeitung bietet das vorliegende Datenmaterial damit eine wesentlich verbesserte Grundlage, eine regional strukturgeologische Interpretation in der Zeitdomäne durchzuführen.
- Die Bearbeitung der Seismik in Tiefe (Teilaspekt 2) wurde mit Hilfe etablierter Methoden handwerklich sorgfältig durchgeführt, erreicht aber in ihrer Ausführung nicht die Qualität der Bearbeitung der Seismik in Zeit. Dennoch liefert sie ein wertvolles zentrales Ergebnis in adäquater Qualität.
- Der im Rahmen der Bearbeitung in Tiefe gewählte Ansatz zur Beschreibung der Unsicherheiten hinsichtlich der Tiefenlage ist sehr einfach formuliert und berücksichtigt nur wenige Aspekte, die einen Einfluss auf die Sensitivität des Ergebnisses haben könnten. Dennoch resultiert das Vorgehen in einer sehr konservativen Abschätzung, die ausreichend scheint um mögliche Ungewissheiten zu beschreiben.

2.2 Teilaspekt seismische Datenverarbeitung in Zeit

2.2.1 Resümee

Die von der Firma DMT Petrologic GmbH, mit Sitz in Hannover (Deutschland) durchgeführte seismische Datenverarbeitung der im Messgebiet zur Verfügung stehenden seismischen Datensätze, bestehend aus Profilen der 2011-2012er, 80iger und 90iger Nagra Seismik Kampagnen, sowie relevanter älterer Profile der Kohlenwasserstoffindustrie, liefert ein für die regional strukturgeologische Interpretation geeigneten Datensatz.

Die noch in der Studie von Roth (Roth, Naef und Schnellmann 2008) erwähnte Heterogenität des seismischen Datensatzes, der zur geologischen Auswertung zur Verfügung stand, konnte durch die Bearbeitung im Rahmen der Verfahrensgenauigkeit beseitigt werden. Die Bearbeitung mittels etablierter, standardisierter Verfahren und die Verwendung neuerer Abbildungstechniken,

fürte zu einem harmonisierten Datensatz, der zudem eine erhebliche Abbildungsverbesserung bei Profilen älterer Generationen aufweist. Aus der Sicht der geophysikalischen Datenverarbeitung bietet das vorliegende Datenmaterial damit eine wesentlich verbesserte Grundlage, eine regional strukturgeologische Interpretation in der Zeitdomäne durchzuführen.

Die Datenverarbeitung wurde, basierend auf den im Rahmen dieser Stellungnahme zugänglichen Informationen sorgfältig durchgeführt. Die vorliegende Dokumentation der Arbeiten durch DMT Petrologic GmbH ist ausführlich und erlaubt das Nachvollziehen der einzelnen Arbeitsschritte. Dies und die regelmäßig dokumentierten Arbeitstreffen der Nagra mit der DMT Petrologic GmbH weisen auf eine gute Projektkontrolle hin.

Die durchgeführte Bearbeitungssequenz lässt eine unmittelbare Bestimmung resultierender Unsicherheiten nicht zu. Die vorliegende Bearbeitung und die damit verbundenen Ergebnisse können aber dazu benutzt werden, mögliche Ungewissheiten zu beschreiben. Dies ist aber nicht Aufgabe der seismischen Datenverarbeitung, sondern Bestandteil der Interpretation. Es ist aber zu berücksichtigen, dass das Beschreiben von Fehlergrenzen immer im Zusammenhang der durch die seismische Akquisition zu beantwortenden Fragestellung gesehen werden muss. Mögliche und sicherlich existierende Unzulänglichkeiten in der seismischen Abbildung des Untergrundes haben mitunter keine Relevanz für die Beantwortung der zu prüfenden Parameter im Rahmen der Etappe 2 des SGT.

2.2.2 Einleitung

Im Rahmen der Etappe 2 des Sachplans geologisches Tiefenlager (SGT) müssen die Kenntnisse über die Standorte die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich erlauben. Einen wichtigen Bestandteil dieses Untersuchungsprogrammes bildet der zur Verfügung stehende reflexionsseismische 2D-Datensatz.

Dieser Datensatz, der die Grundlage für die regionale strukturgeologische Interpretation darstellt, besteht zum einen aus den im Winter 2011/2012, im Auftrag von der Nagra akquirierten 2D seismischen Profilen und zum anderen aus reprozessierten 2D-Seismik Daten, die im Messgebiet zwischen den Jahren 1979 und 1996 aufgezeichnet wurden.

2.2.2.1 Vorgehen

Entsprechend der Wichtigkeit der 2D-Seismik Resultate setzt das ENSI zur Beurteilung der eingereichten Arbeiten bezüglich der 2D-Seismik externe Experten ein. Hierbei wird eine grundsätzliche Trennung zwischen der Beurteilung der durchgeführten seismischen Datenverarbeitung und der Begutachtung der vorliegenden strukturgeologischen Interpretation eingeführt.

2.2.2.2 Prüfungsschwerpunkte und Beurteilungsgrundlage

Begutachtungsgegenstand dieses Berichts ist ausschließlich die seismische Datenverarbeitung in der Zeit-Domäne und die seismische Abbildung in Zeit, die sog. Zeitmigration, die zu einem Abbild des Untergrundes im (x,t) -Raum führt und die Grundlage der strukturgeologischen Interpretation darstellt, die im NAB-13-10 (Madritsch, et al. 2013) dokumentiert ist. Begutachtungsgegenstand ist weder die seismische Tiefenkonversion noch die seismische Abbildung in Tiefe (Tiefenmigration), noch die Akquisition der seismischen Daten im Winter 2011/2012.

Für die Beurteilung der Unterlagen zur seismischen Datenverarbeitung stehen für das ENSI insbesondere folgende Aufgaben und Fragestellungen im Vordergrund (Kapitel 1.3):

- Frage 1:** Entsprechen die durchgeführten Arbeiten und die angewandten Techniken dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik bzw. sind sie stufengerecht.
- Frage 2:** Erfolgte die Erarbeitung der Unterlagen und die seismische Datenverarbeitung mit der notwendigen Sorgfalt und Qualitätssicherung
- Frage 4.1:** Sind die Bearbeitungsschritte der Datenverarbeitung nachvollziehbar und mit der nötigen Sorgfalt hinsichtlich der gegebenen Fragestellung ausgeführt worden
- Frage 3 bzw. 4.4:** Sind eventuelle Ungewissheiten und Unsicherheiten ausreichend spezifiziert.
- Frage 4.3:** Wie wirkt sich das Verfahren zur Optimierung des Signal/Rausch-Verhältnisses, der sog. CRS-Stack (Abschnitt 2.2.4.2) hinsichtlich des Erkennens von Störungen und Strukturen aus.

Neben der in Tabelle 2-1 aufgeführten Referenzberichte, die für die hier vorliegende Stellungnahme zur Verfügung standen, stellen insbesondere die Berichte NAB13-09 (DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk 2013) und Nagra 2012a (Petrologic -G. Rybarczyk 2012) und die entsprechenden Beilagen, die wesentlichen Begutachtungsunterlagen dar.

Roth, P., H. Naef, und M. Schnellmann.	Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz, Wettingen: Nagra, 2008.	Jul 2010
Nagra (2011)	Parameteranalyse 2D Seismik 2011 Jura Ost - Nördlich Lägern, Interoil E&P Switzerland AG, Wettingen: Nagra 2011.	Mar 2011
Nagra (2012a)	Abschlussbericht des Reprozessings der Regionalen Seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk. Wettingen: Nagra, 2012.	Jan 2012
Nagra (2012b)	2D-Seismik Nordschweiz 2011/12: Geologische Aufnahme der Aufzeitbohrungen (Teil 1) und Aufzeitmessungen (Teil 2)“ Dr. Heinrich Jäckli AG, DMT GmbH & Co KG, Wettingen: Nagra, 2012.	Sep 2012
Nagra (2012c)	2D-Seismik Nordschweiz 2011/12: Endbericht Messtrup Supervision, Wettingen: Nagra, 2012.	Aug 2012
Nagra (2012d)	2D-Seismik 2011/12 Nordschweiz: Feldbericht, DMT GmbH & Co KG, Wettingen: Nagra, 2012.	Jun 2012
NAB 13-09	Seismische Datenverarbeitung der Nagra 3D-Seismik 2011/12 in Zeit, Wettingen: Nagra, 2013.	Jul 2013
NAB 13-10	Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Wettingen: Nagra, 2013.	Aug 2013

Tabelle 2-1: Vorliegende Referenzberichte

Die seismische Datenverarbeitung besteht im Wesentlichen aus zwei Arbeitspaketen. Zunächst wurde in den Jahren 2009 bis 2011 ein sog. Reprocessing durchgeführt. Dies ist die Neubearbeitung der zur Verfügung stehenden Daten, bestehend aus Profilen unterschiedlicher Nagra Akquisitionskampagnen aus den 1980er und 1990er-Jahren sowie ältere relevante Profile der Kohlenwasserstoffindustrie. Dieser Datensatz besitzt eine Gesamtprofillänge von 1368,9 km (siehe Nagra (2012a); Kapitel 3). Inhalt des zweiten Datenpakets stellt die im Zeitraum von Januar 2012 bis März 2013 durchgeführte seismische Datenverarbeitung der im Winter 2011/2012 akquirierten

2D-Seismik mit einer Gesamtprofillänge von 305,7 km dar. Beide Datenpakete wurden von der Firma DMT Petrologic GmbH in Hannover unter Verwendung der gleichen Bearbeitungssequenz prozessiert. Die Bearbeitungssequenz ist in Tabelle 2-3 abgebildet.

Im Rahmen der Etappe 1 des SGT wurde festgestellt, dass der zur Verfügung stehende Datensatz bestehend aus Aufzeichnungen mehrere Messkampagnen eine große Heterogenität aufweist (Roth, Naef und Schnellmann 2008). Zentrales Ziel neben der Abbildungsverbesserung mit Schwerpunkt Opalinuston in einer Tiefe von 350 bis 600m Tiefe bildet daher die Harmonisierung der zur Verfügung stehenden Daten zur verbesserten Interpretation. Daneben sollen auch tiefere Strukturen erfasst und Störungen detektierbar sein.

2.2.2.3 **Aufbau der vorliegenden Stellungnahme**

Aus Sicht des Berichterstatters ist es von primärer Bedeutung die hier eingesetzten Methoden und Bearbeitungsschritte mit der für diese Aufgabenstellungen standardisierten Bearbeitungssequenzen zu vergleichen und Unterschiede oder Abweichungen besonders zu dokumentieren. Darüber hinaus wird versucht die Qualität der durchgeführten Arbeit anhand der vorliegenden Dokumentationen und Berichten zu beurteilen. Zunächst werden hierzu die Festlegung der Bearbeitungssequenz und die Bearbeitungssequenz selbst beschrieben und beurteilt. Im weiteren Schritt werden spezielle Bearbeitungsschritte beleuchtet, die aus der Sicht des Berichterstatters von besondere Bedeutung für das Ergebnis der seismischen Datenverarbeitung sind.

2.2.3 **Festlegung der Bearbeitungssequenz**

Die Bearbeitungssequenz wurde in der ersten Datenverarbeitungsphase festgelegt, d.h. beim wiederholten prozessieren der Multi-Vintage Daten, also seismischer Daten unterschiedlicher Jahrgänge. Neben den meist unterschiedlichen Witterungs- und Oberflächenverhältnisse während der Akquisition, stellen die unterschiedlichen Akquisitionsparameter, wie z.B. Schuss- und Empfänger Abstand, die daraus resultierende Überdeckung und die in ihrer Signatur und Frequenzgehalt unterschiedlichen seismischen Quellsignale die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Profillinien dar.

Ziel der Neubearbeitung war es, ein gegenüber der Erstbearbeitung verbessertes Abbild geologischer Strukturen zu gewinnen.

Um eine Bearbeitungssequenz zu finden bzw. die von der Firma Petrologic vorgeschlagene Bearbeitungssequenz auf ihre Tauglichkeit zu prüfen, wurde in einer ersten Phase des Projekts die Bearbeitung weniger Linien durchgeführt. Die als positiv bewerteten Ergebnisse dieser Testdatenverarbeitung führten zum sukzessiven Bearbeiten der in Nagra (2012a) (Petrologic -G. Rybarczyk 2012) Kapitel 3 aufgeführten Profile.

Eine gemeinsame Bearbeitungssequenz ist hier nicht mit einer einheitlichen Bearbeitung unter Verwendung gleicher Parameter zu verwechseln. Nötige individuelle Bearbeitungsschritte wurden separat für jedes der zu bearbeitenden seismischen Profilen vorgenommen (z.B. die Spur-Editierung) und Operatoren (z.B. Muting) wurden individuell auf die entsprechenden Datensätze angepasst. Gleichzeitig wurden aber die nötigen Bearbeitungssequenzen so aufeinander abgestimmt, dass durch das erneute Bearbeiten eine Harmonisierung des Datenbestandes durchgeführt wurde (z.B. Pre-Stack Filterung/Skalierung und Minimum Delay Transformation). Bedeutsam in diesem Zusammenhang und oft unterschätzt sei auch die Bearbeitung durch ein und dieselbe Person zu erwähnen, ein Faktor der maßgeblich zur einheitlichen Verarbeitung der Daten

beiträgt. Alle Schritte wurden soweit dies aus den Unterlagen nachvollziehbar ist, sorgfältig durchgeführt.

Die Harmonisierung des Datenbestandes mit dem Ziel eine einheitliche Datengrundlage zur regional strukturgeologischen Interpretation zu erhalten war ein adäquater und notwendiger Schritt zum Zeitpunkt der Durchführung, wäre aber in Anbetracht der Datenverfügbarkeit zumindest der Multi-Vintage Daten, zu einem früheren Zeitpunkt möglich gewesen.

Im Rahmen der Harmonisierung ist es vorteilhaft eine gemeinsame Bearbeitungssequenz für unterschiedliche Datensätze zu benutzen. Wie oben schon erwähnt wurde in einem ersten Schritt die Bearbeitungssequenz nur auf einen ausgewählten Teil der Daten angewendet. Bei der Auswahl der Profillinien spiegeln sich sowohl die regionale Verteilung als auch die akquisitionsbedingten Unterschiede (Alter und Akquisitionsparameter) wieder. In Tabelle 2-2 sind die in das Testprocessing aufgenommenen Profillinien mit ihren spezifischen Akquisitionsparametern dargestellt. Die regionale Verteilung über die Untersuchungsgebiete Jura-Südfuss, Jura-Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost kann auf der Basemap Beilage 2.1 NAB 13-10 (DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk 2013) eingesehen werden.

Profillänge	Akquisitionsjahr	Quelle	Sweep [Hz]		Gruppenintervall	Schusspktabstand	Abtastrate	Geometrie	Auslage	
			min	max					min offset	max offset
42,2	1981	Vibrator	15	61	50	50	4	Split spread symmetrical	175	1325
31,1	1982	Vibrator	11	61	20	20/40	4	Split spread symmetrical	40	1460
15,3	1982	Vibrator	11	61	25	25/50	4	Split spread symmetrical	50	1825
10,4	1982	Vibrator	11	61	25	25/51	4	Split spread symmetrical	50	1825
39,2	1982	Vibrator	11	61	25	25/52	4	Split spread symmetrical	50	1825
12	1982	Vibrator	11	61	25	25/53	4	Split spread symmetrical	50	1825
13,3	1982	Vibrator	11	61	25	25/54	4	Split spread symmetrical	50	1825
7,6	1983	Vibrator	11	61	20	20/40	4	Split spread symmetrical	40	1460
5,9	1983	Vibrator	13	103	10	10/20	2	Split spread symmetrical	30	740
21,4	1983	Vibrator	11	61	20	20/40	4	Split spread symmetrical	40	1460
8,5	1983	Vibrator	13	103	10	10/20	2	Split spread symmetrical	30	740
9,1	1983	Vibrator	11	61	20	20/40	4	Split spread symmetrical	40	1460
34,1	1983	Vibrator	11	61	20	20/40	4	Split spread symmetrical	40	1460
34,5	1983	Vibrator/Dynamit	18	90	30	30/60	2	Split spread symmetrical	105	1875
7,6	1983	Vibrator/Dynamit	18	90	30	30/60	2	Split spread symmetrical	105	1875
28,2	1983	Vibrator/Dynamit	18	90	25	25/50	2	Split spread symmetrical	62	1537
23,5	1983	Vibrator/Dynamit	18	90	25	25/50	2	Split spread symmetrical	62	1537
38,7	1983	Vibrator/Dynamit	16	85	25	25/50	2	Split spread symmetrical	62	1537
13,8	1984	Dynamit	X	X	12,5	12,5/25	2	Split spread symmetrical	12,5	600
23,7	1984	Vibrator	11	61	25	25/50	2	Split spread symmetrical	50	1825
13,4	1984	Vibrator	11	61	25	25/50	4	Split spread symmetrical	50	1825
20,4	1991	Vibrator	12	80	25	25/50	2	Split spread symmetrical	62,5	1537,5
14,8	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930
15,6	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930
14,5	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930
13,1	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930
23,7	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930
33,7	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930
12,7	1992	Vibrator/Dynamit	8	120	20	20/40	2	Split spread symmetrical	30	1930

Tabelle 2-2: Ausgewählte Profillinien für das zu Beginn des Reprocessings ausgeführte Testprocessing

Dieses Vorgehen zeigt das Bemühen der Auftraggeber mit der erneuten seismischen Bearbeitung eine größtmögliche Abbildungsverbesserung zu erzielen. Hierzu sei anzumerken, dass eine eventuelle Vergabe des Testprocessings an einen oder mehrere andere seismische Processingkontraktoren für eine noch größere Gewährleistung der maximal zu erzielenden Abbildungsverbesserung durch die erneute seismische Datenverarbeitung dargestellt hätte. Da aber die vorhandenen technischen Möglichkeiten bzw. Variationen, der Bearbeitungssequenz mit dem Ziel einer Abbildung des Untergrunds in der Zeitdomäne begrenzt sind und mit der Firma DMT Petrologic GmbH ein erfahrener seismischer Kontraktor gewählt wurde, ist davon auszugehen, dass die Auswirkung auf das Ergebnis der nicht Einbeziehung anderer Anbieter seismischer Datenverarbeitung in die Testbearbeitung, letztlich nicht ausschlaggebend für die Qualität des Endproduktes ist.

2.2.4 Datenverarbeitung

2.2.4.1 Bearbeitungssequenz

Der visuelle Vergleich, der neu prozessierten Daten und der ursprünglichen Datenverarbeitung zeigt die erfolgreiche Umsetzung der oben angesprochenen Ziele. Die eindrucksvollen Abbildungsverbesserungen, die gut anhand der Kontinuität der seismischen Reflexionen verifiziert werden kann, wird dabei maßgeblich durch zwei Bearbeitungsschritte erzielt. Dies ist zum einen die Grund- und Reststatik Korrektur und zum anderen die Common-Reflection-Surface-Stack Bearbeitung, wobei der Statikkorrektur die weitaus größere Bedeutung zukommt.

In Tabelle 2-3 ist die seismische Bearbeitungssequenz für die Zeitmigration dargestellt. Der Ablauf der Datenverarbeitung ist in Bearbeitungsabschnitte und Bearbeitungsschritte unterteilt. Dabei enthält ein Bearbeitungsabschnitt mehrere Bearbeitungsschritte.

Prozessierte Datenpakete, die einen informellen Charakter für die struktureologische Interpretation haben sind dabei mit der Codierung P1-P5 gekennzeichnet.

Bearbeitungsabschnitt		Codierung	Bearbeitungsschritt	
Preprocessing			Dateneingabe	
		A1	Geometrievorgabe Statische Spureditierung	
		A2	Minimum Delay Transformation	
		A3	Sphärische Divergenz Korrektur	
		A4	Amplitudenvergleich	
		A5	Einzelspur Spike Dekonvolution	
		A6	Statische Grundkorrektur Ersteinsatz Bestimmung und Berechnung der Refraktionsstatik	
		A7	Statische Restkorrekturen	
		A8	Statikkorrekturen zur Integration von Aufzeitmessungen und Misfit Minimierung	
		A9	Dynamische Korrekturen	
		A10	Polarität	
		A11	Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch Air-Blast-, Surface Wave- und Coherent Noise Attenuation	
		A12	CDP abhängiges Muting	
		A13	PreStack Filterung und Skalierung	
	AA	Datenausgabe PreProcessing		
Konventionell	Stacking	B1	Stapelung	
		B2	PostStack Bearbeitung: Rausch Unterdrückung, Zerophase Transformation, Filterung, Skalierung	
		P1	Datenausgabe Stapelung	
	PostStack Migration	B1	Stapelung	
		P2	Datenausgabe PostStack-Migration	
Common-Reflection-Surface	Stacking	D	CRS Processing Parameterbestimmung, CRS Gather	
		DA	Datenausgabe CRS Gather	
			Dateneingabe AA	
	PostStack Migration	E2	CRS Stapelung	
		E3	PostStack Bearbeitung: Rausch Unterdrückung, Zerophase Transformation, Filterung, Skalierung	
		P3	Daten ausgabe CRS Stacking	
	PreStack Migration	Stacking	E2	CRS Stapelung
			F1	FD Migration
			F2	PostStack Bearbeitung: Rausch Unterdrückung, Zerophase Transformation, Filterung, Skalierung
		PostStack Migration	P4	Datenausgabe PostStack CRS Migration
				Dateneingabe DA
PreStack Migration	PreStack Migration	G1	PreStack Kirchhoff Zeit Migration 1. Iteration	
		G2	RMS Geschwindigkeitsanalyse	
		G3	PreStack Kirchhoff Zeit Migration 2. Iteration	
		G4	CDP abhängiges Muting	
		G5	Stapelung	
		G6	PostStack Bearbeitung: Rausch Unterdrückung, Zerophase Transformation, Filterung, Skalierung	
	P5	Datenausgabe PSTM CRS Migration		

Tabelle 2-3: Seismische Bearbeitungssequenz für die Zeitmigration der Multi-Vintage Daten und der in den Jahren 2011/2012 neu akquirierten Daten.

Grundsätzlich sind bei der vorliegenden Zeitbearbeitung drei Arten von Abbildungen des Untergrunds zu unterscheiden: 1) die Stapelung, 2) die Post-Stack Migration und 3) die Pre-Stack Migration. Das Verfahren mit der Kennziffer 3 weist dabei theoretisch die beste Abbildungsqualität auf gefolgt von Verfahren Nr.2.

Die unter Bearbeitungsabschnitt Preprocessing und Konventionell mit grün und rot markierten Bearbeitungsschritte stellen eine Standardbearbeitungssequenz für 2D seismische Daten dar, wie sie z.B. auch bei Firmen im Rahmen der Kohlenwasserstoffsuche in Auftrag gegeben wird.

Im Folgenden wird deshalb hauptsächlich auf die sogenannte Common-Reflection-Surface Technologie eingegangen, die kein allgemein etabliertes Verfahren darstellt und es werden die Bearbeitungsschritte näher beleuchtet, die maßgeblich an der Verbesserung der Abbildungsqualität beteiligt sind.

Soweit die zur Verfügung gestellten Unterlagen eine Beurteilung zulassen wurde die Standardbearbeitung (Bearbeitungsschritte A1 bis C2 Tabelle 2-3) mit der nötigen Sorgfalt durchgeführt. Der Methodik zur Bestimmung der Grund- als auch der Rest-Statikkorrektur kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Hier wurde bei der Bearbeitung ein Verbesserungspotential erkannt und durch die geeignete Kombination von existierenden Untersuchungen bzw. Messungen und neuen Analysen in eine deutliche Abbildungsverbesserung umgesetzt. Dies zeigt sich im Vergleich von Erst und Neubearbeitung der seismischen Multi-Vintage Daten.

Abbildung 2-1 zeigt den Vergleich von neuer und alter Datenverarbeitung einer Profillinie auf Basis des Stapelergebnisses nach Grund- und Reststatik-Bearbeitung (siehe Datenausgabe Stapelung P1 Tabelle 2-3). Die Kontinuität seismischer Reflexionen und damit die verbundene Abbildungsverbesserung sind deutlich sichtbar. Eine leichtere strukturgeologische Interpretation dank der gesteigerten Kontinuität seismischer Reflektoren ist möglich. Obwohl nicht alle Verbesserungen durch Anwendung der neuen Statikkorrektursequenz so nachhaltig sind wie in Abbildung 2-1, kann generell von einer deutlichen Verbesserung ausgegangen werden.

Neben der Statikkorrektur scheint die sorgfältige, variierende Auswahl einer geeigneten Mute-Funktion (Bearbeitungsschritt A12) teilweise zur Abbildungsverbesserung beigetragen zu haben. Exemplarisch ist hierzu in Abbildung 2-2 der Unterschied zwischen zwei Mute-Funktionen zu sehen. Die wesentliche Abbildungsverbesserung wird hier durch die geeignete korrekte Mute-Funktion erzielt. Der Unterschied in der Kontinuität und Auflösung seismischer Reflexionen ist deutlich zu sehen.

Die Minimum-Delay Transformation, die sorgfältig und unter Berücksichtigung der verschiedenen Quellsignale durchgeführt wurde und die daraus resultierende einheitliche Phasenlage des gesamten Datensatzes, erleichtern eine einheitliche Interpretation und stellen einen wichtigen Schritt in der Harmonisierung des zur Verfügung stehenden Datenmaterials dar.

Die eingesetzten Verfahren zur Post- und Pre-Stack-Migration sind Standardverfahren. Mit der bei der Post-Stack-Bearbeitung verwendeten Finite-Differenzen-Migration wurde ein Verfahren aus der Klasse der Wellenfeld-Extrapolations- (bzw. Differential-) Techniken gewählt. Die bei der Pre-Stack-Bearbeitung verwendete Kirchhoff-Migration gehört dagegen zur Klasse der sog. Integral oder Hoch-Frequenz-Approximationstechniken und ist die wohl am meisten eingesetzte Technik, insbesondere für die hier durchgeführte Zeit-Migration. Sowohl die Post- als auch die Pre-Stack-Migration könnte unter Verwendung anderer Verfahren durchgeführt werden. Ob eine wesentliche Verbesserung der Abbildungsqualität erreicht werden könnte ist allerdings fragwürdig, bleibt aber im Zweifel zu prüfen.

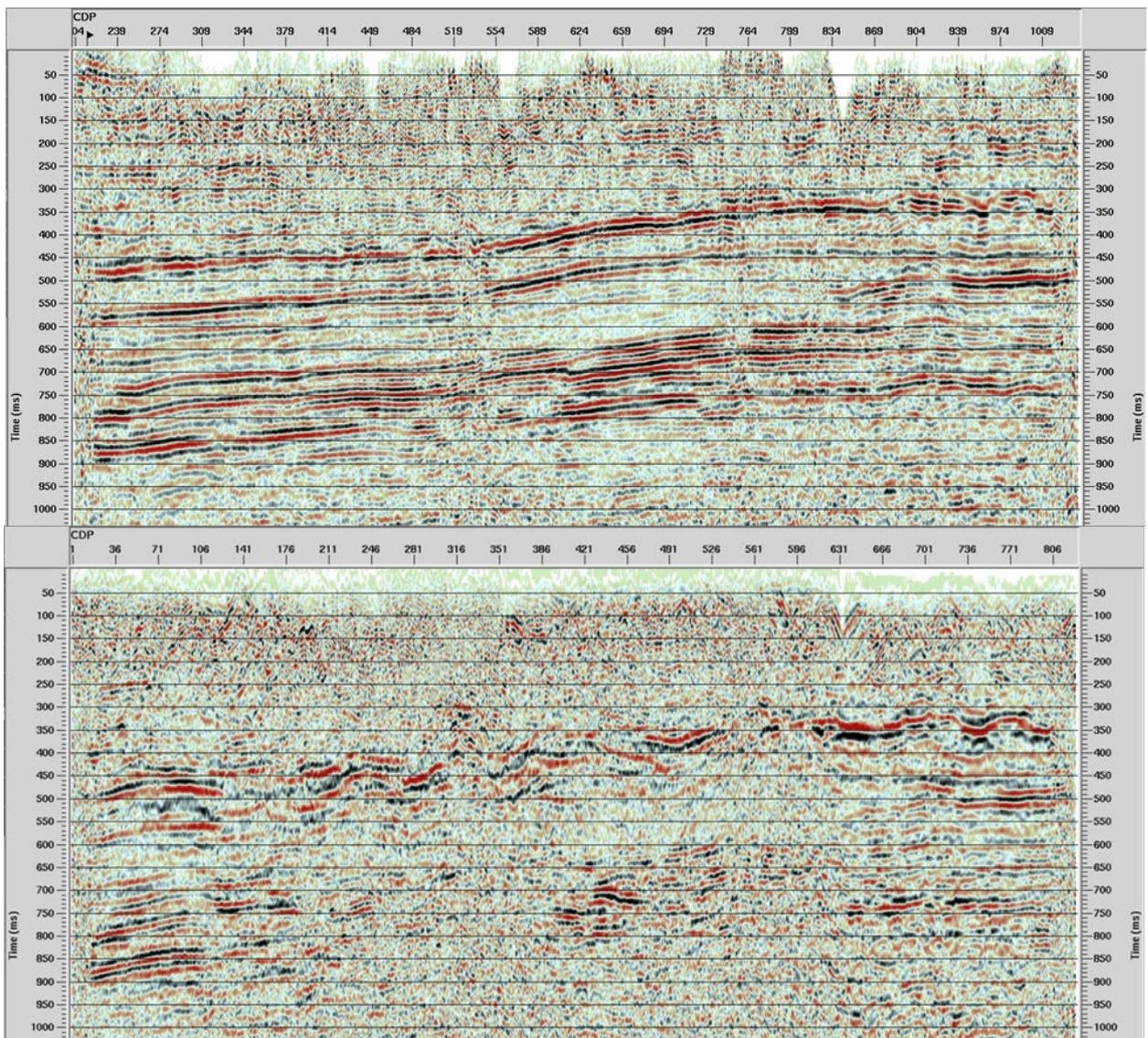


Abbildung 2-1: Ausschnitt der Profilinie 82-NS-20; oben neue Bearbeitung Stapelung nach Grund und Reststatik (P1 in Tabelle 2-3); unten Stapelung bei Erstbearbeitung.

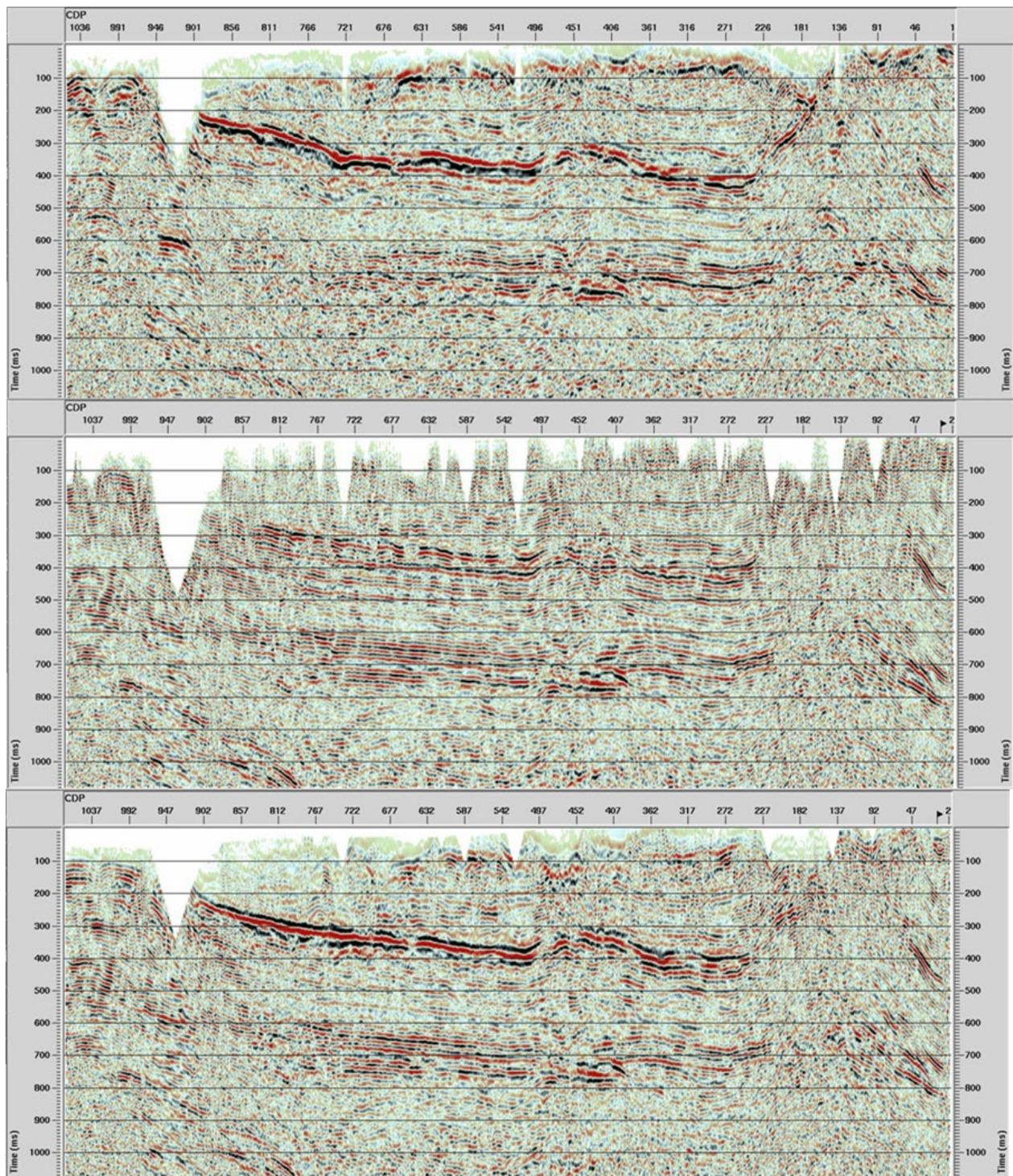


Abbildung 2-2: Profilinie 82-NX-60; Oben Stapelung bei Erstbearbeitung; Mitte: neue Bearbeitung Stapelung nach Grund und Reststatik (P1 Tabelle 2-3) mit korrektem Mute; Unten: neue Bearbeitung Stapelung nach Grund und Reststatik (P1 Tabelle 2-3) mit „inkorrektem“, d.h. vermutlich zu offenem Mute.

2.2.4.2 CRS –Bearbeitung

Zusätzlich zu den oben angesprochenen Verbesserungen, die maßgeblich durch eine handwerklich sorgfältige und detaillierte Arbeit unter Einsatz herkömmlicher Standardverfahren erzielt wurde, ist mit dem sog. Common-Reflection-Surface-Stack-Verfahren eine seismische Datenverarbeitungstechnik zum Einsatz gekommen, die gerade bei Datensätzen mit geringem Signal-Rausch-Verhältnis eine verbesserte Abbildungsqualität liefern kann.

Das Verfahren wurde erstmals von (T. Müller 1999) erwähnt und hat den Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren, dass beim Prozess des Stapelns nicht nur der Parameter der Stapelgeschwindigkeit eine Rolle spielt, sondern auch Informationen über die seismische Reflektorgestalt verarbeitet werden. In zahlreichen Veröffentlichungen wurde das Verfahren seither erfolgreich angewandt (z.B. (Eisenberg-Klein 2008), (Pruessmann 2004)). In (Gierse, et al. 2007) wird die CRS Technologie sogar im seismischen Akquisitionsdesign dazu benutzt, mit einer niedrigeren Überdeckung Daten zu akquirieren und dieses durch die Datenverarbeitung mit Hilfe des CRS-Verfahrens auszugleichen.

Daher ist der Ansatz die Abbildungsqualität der Multi-Vintage-Daten mit zum Teil schlechtem Signal-zu-Rausch Verhältnis mit Hilfe der CRS-Technologie zu verbessern sinnvoll und hat teilweise die Abbildungsqualität erhöht, wie der Vergleich der Profillinie 83-NF-31 in Abbildung 2-4 zeigt. Hier handelt es sich um ein aus zwei Teilprofilen zusammengefügtes seismisches Profil. Das Aufnahmejahr für beide ist identisch aber es wurden unterschiedliche Akquisitionsparameter verwendet (siehe Tabelle 2-4). Sowohl Schuß- als auch Empfängerabstand und verwendetes Quell-signal sind unterschiedlich. Im rechten Teil der Abbildung, der mit größerem Gruppenintervall akquiriert wurde, vermag die CRS-Stapelung die vermeintlich schlechteren Akquisitionsparameter auszugleichen und beschreibt damit genau das gleiche Verhalten wie in oben (Gierse, et al. 2007) beschrieben.

Generell lässt sich beobachten, dass bei den Daten jüngerer Akquisitionsdatums eine wesentlich geringere Erhöhung der Abbildungsqualität mit dem Verfahren zu erzielen ist. Exemplarisch ist dies anhand des Vergleichs der Resultate von alter und neuer Bearbeitung der Profillinie 91NO66 in Abbildung 2-4 dargestellt.

Die CRS-Stapelungstechnik besitzt, wie oben mehrfach angedeutet und in zahlreichen Veröffentlichungen gezeigt, ihre Stärk darin, bei Daten mit geringer Überdeckung und/oder Aufnahmen mit geringem Signal-zu-Rausch-Verhältnis eine Erhöhung der Abbildungsqualität zu erzeugen. Dieser positive Effekt geht aber mitunter zu Lasten der Störungsdetektierung und es kommt zum Verwischen der seismischen Reflexion am Ort des Versatzes. Eine Störung kann so leicht als Faltung missinterpretiert werden. Es muss also eine Ausgewogenheit zwischen seismischer Reflektorkontinuität und Störungsdetektierbarkeit gefunden werden. Bestimmender Parameter hierfür ist die sogenannte CRS-Apertur, die vom Bearbeiter festzulegen ist. Hertweck (Hertweck, Schleicher und Mann 2007) zeigen hier wie mittels der Fresnel-Zone eine optimale Apertur gefunden werden kann.

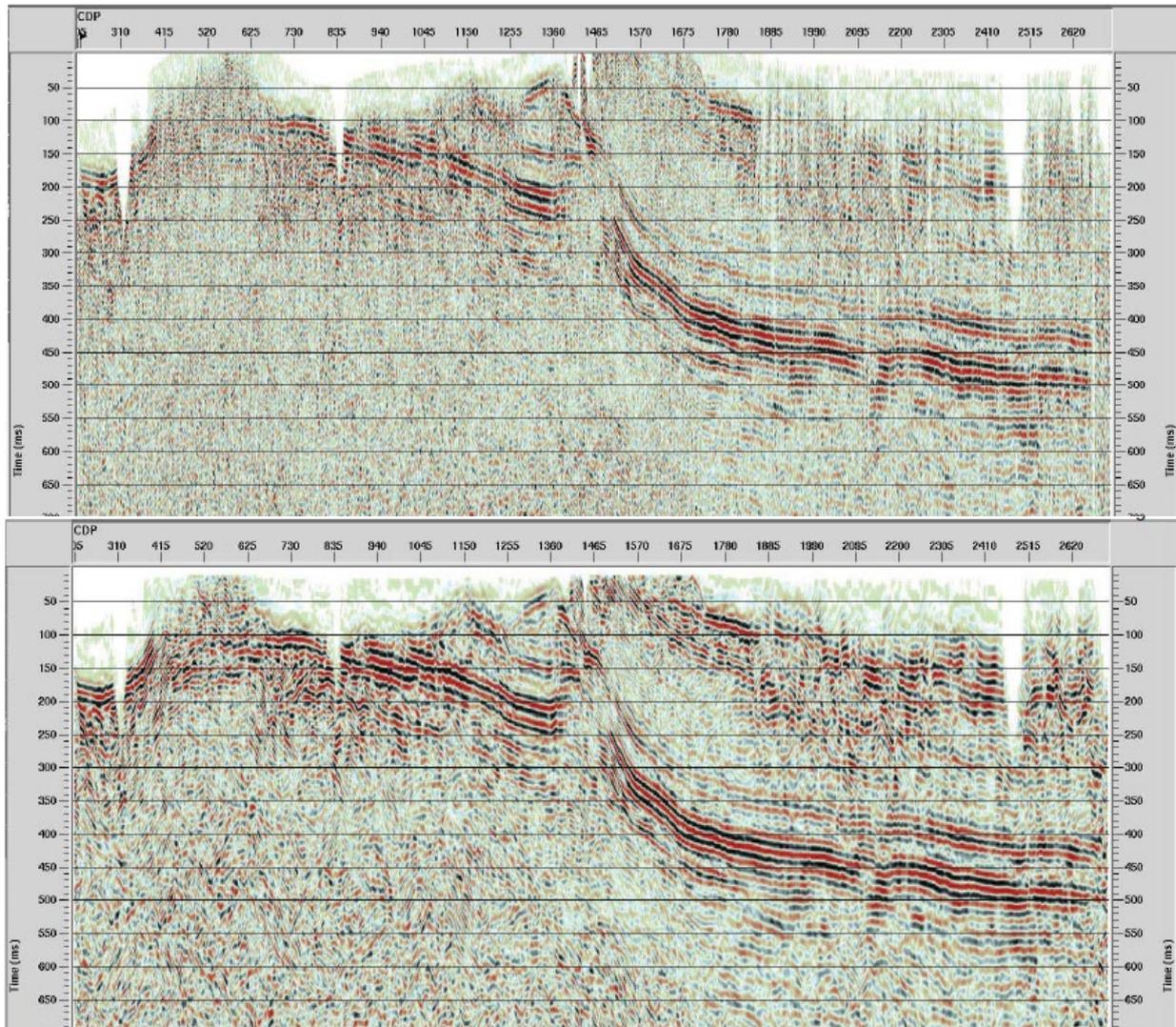


Abbildung 2-3: Profillinie 83-NF-31: Oben: Konventionelle Stapelung; Unten: CRS-Stapelergenis; Profillinie besteht aus zwei im Rahmen des Reprocessings zusammengefügte Profillinien 83-NF-31HR (linker Teil des Abbilds) und 83-NF-31ST (rechter Teil des Abbilds) mit unterschiedlichen Akquisitionsparametern siehe Tabelle 2-4.

NAME	CDP Abstand	Profillänge	Sweep [Hz]	Gruppenintervall	Schusspktabstand	Abtastrate	minimale Auslage [m]	maximale Auslage [m]
83NF31HR	5	8,5	13 103	10	10/20	2	30	740
83NF31ST	10	9,1	11 61	20	20/40	4	40	1460

Tabelle 2-4: Akquisitionsparameter der zusammengefügte Teilprofilinien 83-NF-31

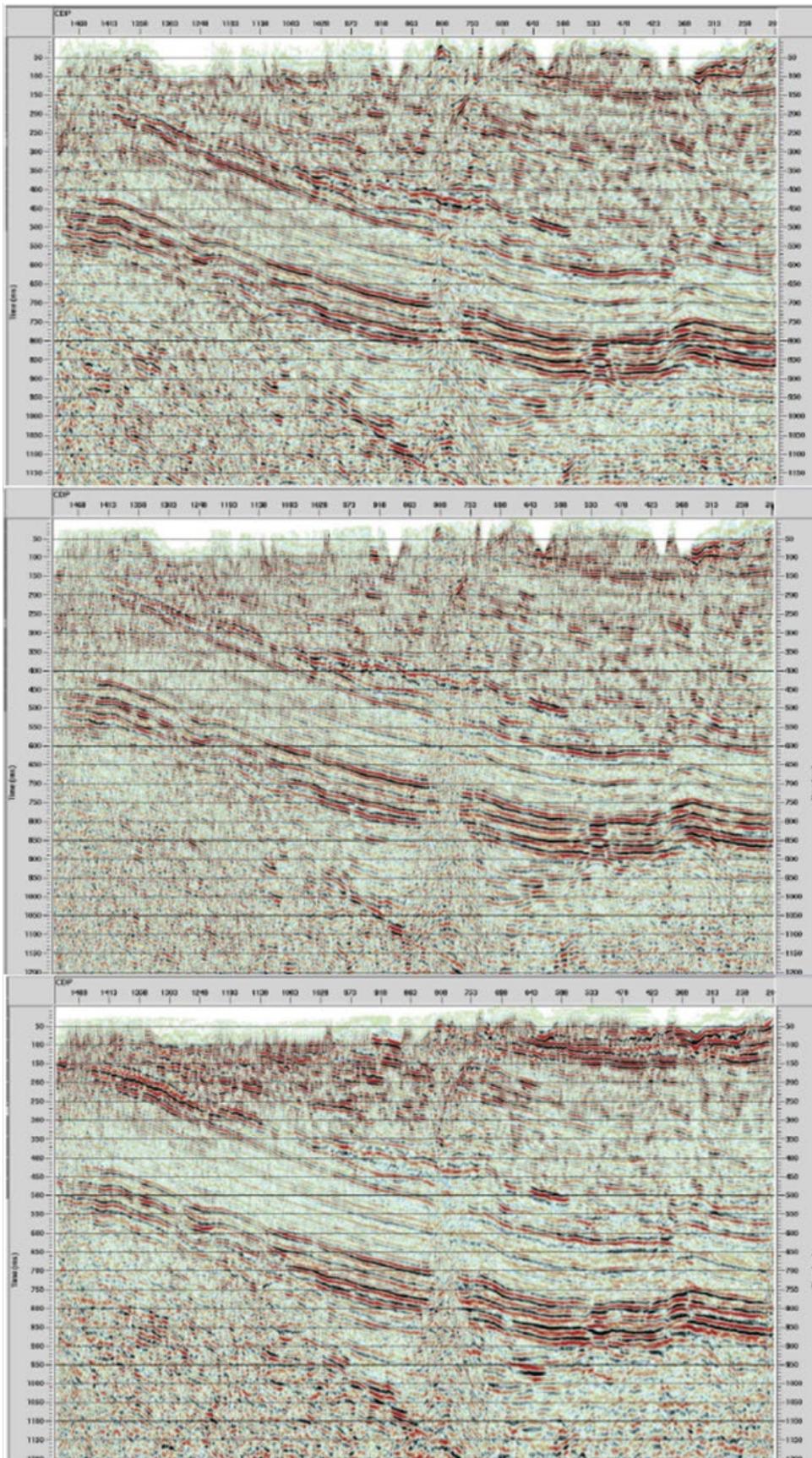


Abbildung 2-4: Ausschnitte aus Profilinie 91-NO-66; Oben: neue Bearbeitung CRS Stapelung; Mitte: neue Bearbeitung Stapelung nach Grund und Reststatik; Unten: Erstbearbeitung.

Der von der Nagra im Winter 2011/2012 akquirierte Datensatz ist mit seinen Akquisitionsparametern (Gruppen und Schussintervall 6 m) kein typischer Kandidat für eine CRS-Stapelung. Um eine einheitliche seismische Datenverarbeitung durchzuführen und einen homogenen Datensatz aus alter und neuer Seismik zu erzeugen wurde aber dieselbe Bearbeitungssequenz gewählt. Die Auswirkung der klassischen CRS-Stapeltechnik ist aber bei der Bearbeitung der neuen Seismik gering bzw. auf den ersten Blick kaum ersichtlich. Abbildung 2-5 zeigt einen Vergleich von konventioneller und CRS-Stapelung der neuen Seismik. Der sichtbare Unterschied besteht nur in einem generell erhöhten Energieniveau. Die Kontinuität der seismischen Reflexionen ist nicht unterschiedlich. Dies und die unveränderten Lücken nahe der Oberfläche lassen darauf schließen, dass mit einer geringen CRS-Apertur gearbeitet wurde, d.h. es kann davon ausgegangen werden, dass die Störungsdetektion durch die CRS-Stapelung nicht negativ beeinflusst ist. Eine optimierte Fresnel-Zonen-Apertur-Berechnung ist nicht dokumentiert.

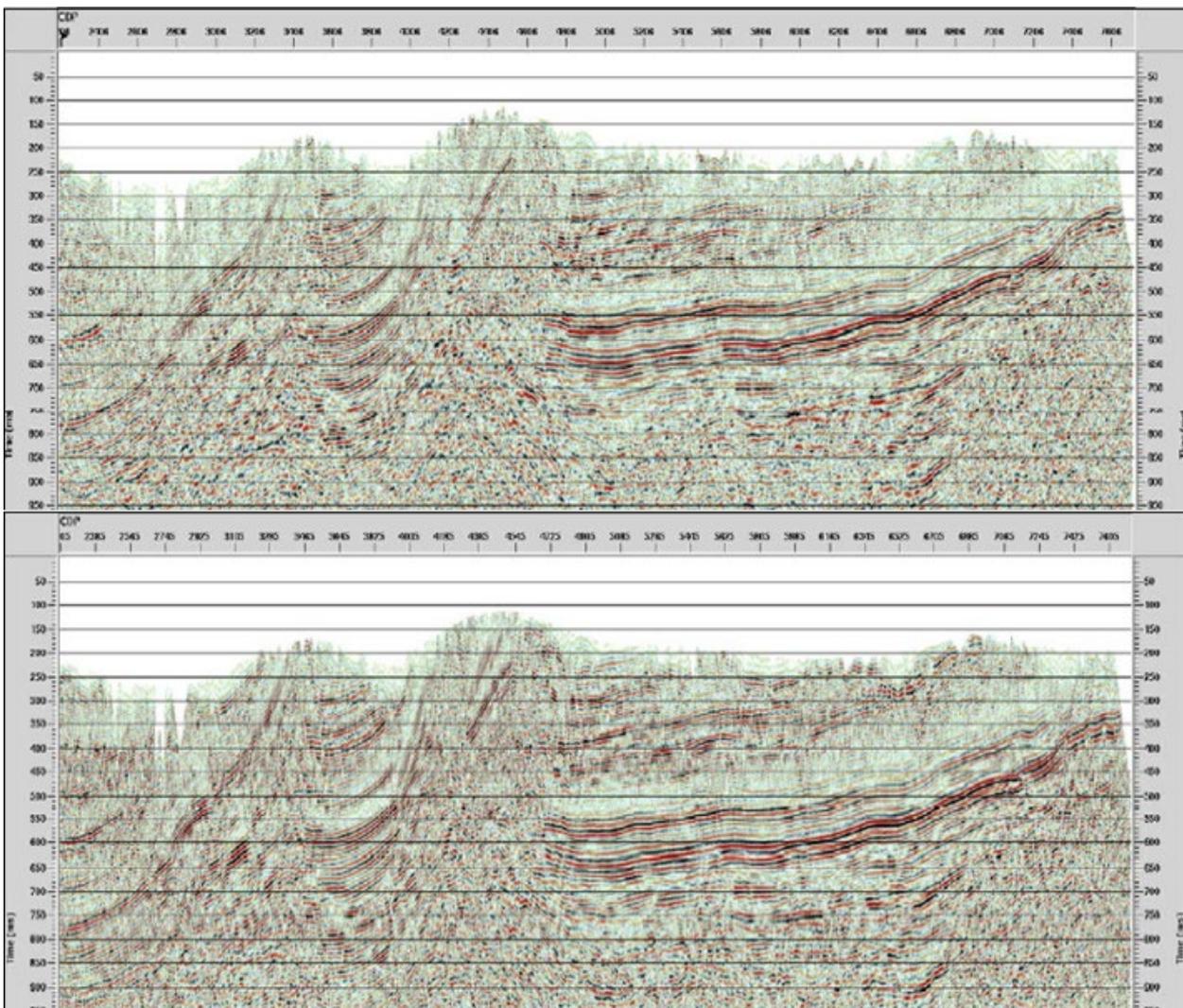


Abbildung 2-5: Ausschnitt aus Profil 11NS02 Oben: Konventionelles Stapel-Ergebnis; Unten: CRS-Stapelung

Die Verwendung einer erweiterten CRS-Apertur könnte unter Umständen zu einer Abbildungsverbesserung tieferer Strukturen führen, da davon ausgegangen werden kann, dass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei größeren Laufzeiten niedriger ist und damit die Funktionalität des Verfahrens deutlicher zum Tragen kommen würde. Allerdings könnte dies z.B. zur Beeinträchtigung der Detektierbarkeit von Störungen im primären Targetbereich, dem Opalinuston führen und daher ist die Entscheidung eine kleine Apertur zu wählen nachvollziehbar und richtig.

Neben der oben mehrfach erwähnten CRS-Stapelung zur Erzeugung einer Zero-Offset Sektion wurde während der Bearbeitung die Technik des sog. Partial-CRS-Stacks angewandt (siehe Bearbeitungsschritt D bzw. DA in Tabelle 2-3).

Diese Technologie geht auf die Arbeit von Baykulov [(Baykulov 2008), (Baykulov 2009)] zurück und benutzt die CRS-Technologie um Eingangsdaten für eine Pre-Stack Migration zu erzeugen. Es werden dabei sog. CRS-Super-Gather generiert und gleichzeitig eine Regularisierung durchgeführt. Das hier im Rahmen der Datenverarbeitung verwendete Verfahren der CRS-Stapelung wurde entwickelt um eine Zero Offset Sektion zu simulieren, d.h. Daten zu erzeugen, die theoretisch an einer Stelle gemessen werden, an dem Schuss und Empfänger sich an derselben Lokation befinden. Gleichwertig einer NMO/DMO Analyse mit subsequenter Stapelung der Moveout korrigierten ungestapelten CMP-Daten. Der hier verwendete Ansatz ist daher nur bedingt richtig, denn die zu Grunde liegenden Gleichungen und die sich bei der Bearbeitung ergebenden und benutzten Parameter gelten im strengeren Sinne nur für den Zero-Offset-Fall. Bergler (Bergler 2001) und Zhang (Zhang 2001) entwickeln die mathematische Grundlage bzw. die konzeptionelle Weiterentwicklung des CRS-Konzepts auf den Offset Fall (die sog. CO-CRS Technik) und liefern damit die korrekte Grundlage für die oben erwähnte Anwendung, vorteilhaftere, d.h. im Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbesserte Eingangsdaten für die Pre-Stack Bearbeitung zu erzeugen. Müller (Müller und Spinner 2010) und Spinner (Spinner 2012) geben hierzu Realdatenbeispiele und zeigen wie das CO-CRS-Verfahren erfolgreich zur Abbildungsverbesserung beiträgt und im Vergleich zu der von Baykulov (Baykulov 2009) eingeführten Technik bessere Ergebnisse liefert. Dieser Prozess ist allerdings mit einem erheblichen rechnerischen Mehraufwand verbunden und die Bearbeitungssequenz wird nach heutigem Kenntnisstand von keinem seismischen Datenverarbeitungscontractor angeboten.

Trotz der nicht korrekten mathematischen Grundlagen wird die Technik erfolgreich eingesetzt und bietet neben verbesserten Eingangsdaten in die Pre-Stack Migration auch Vorteile bei der dynamischen Korrektur. Der Effekt wird von Gierse (G. H.-K. Gierse 2009) beschrieben und findet auch bei der Bearbeitung der hier vorliegenden Seismik seine Anwendung. Abbildung 2-6 zeigt exemplarisch die Geschwindigkeitsanalyse an einer CDP Position der Profillinie 11-NS-06 mit und ohne CRS Bearbeitung. Das verbesserte Signal-zu-Rausch-Verhältnis in den CDP Gittern ist deutlich zu sehen und erhöht damit die Qualität der abgeleiteten Geschwindigkeitsfunktion. Dies und der Effekt der Regularisierung, die mit Hilfe der Partial-CRS Technologie erreicht wird rechtfertigen den Einsatz des Verfahrens.

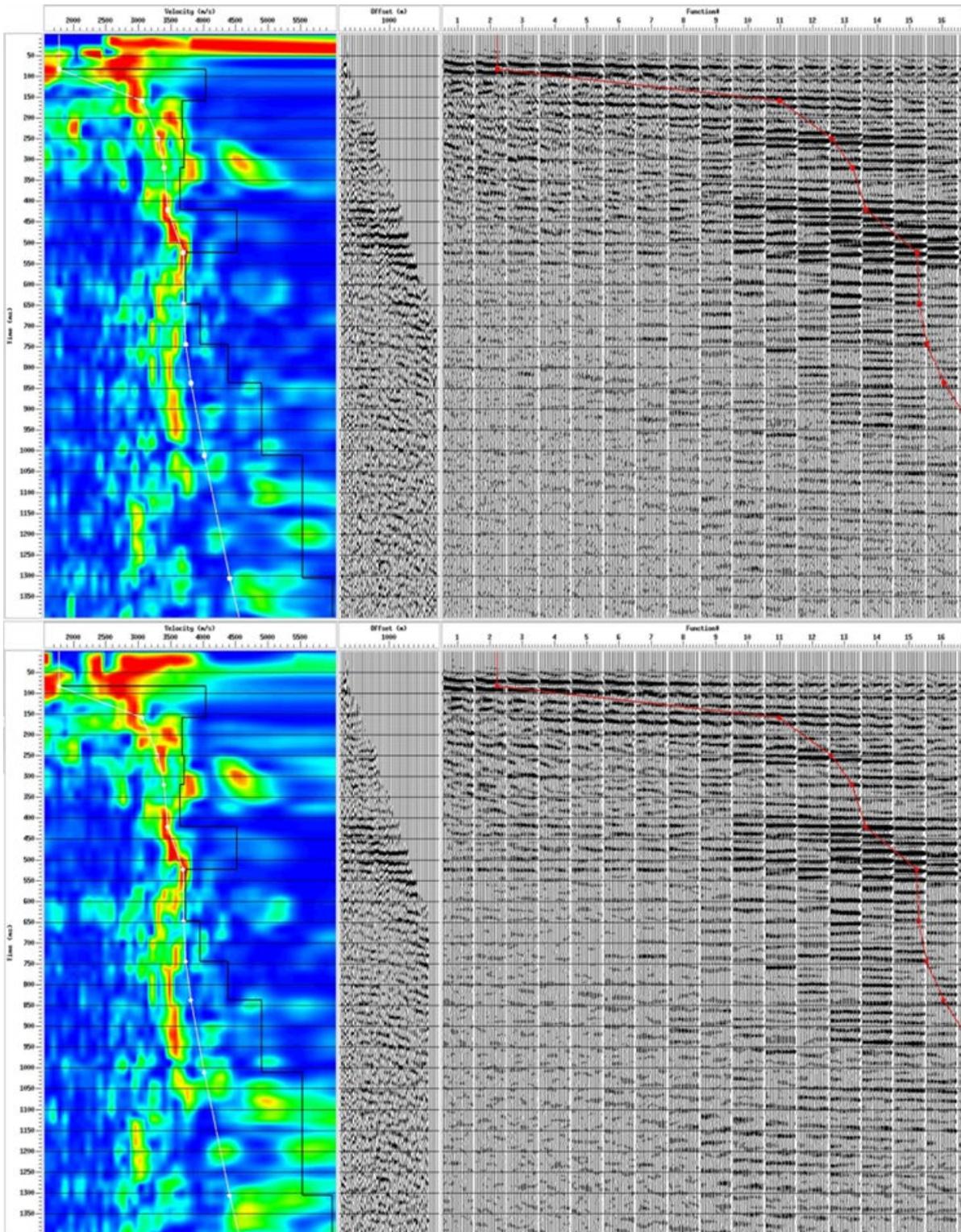


Abbildung 2-6: Profil 11-NS-06 Dynamische Korrektur bzw. Semblance Geschwindigkeitsanalyse an Position CDP 6000; Links: Semblance Plot; Mitte: Gather; Rechts: Stack Panels; Oben: Ohne CRS Bearbeitung; Unten: Mit CRS Bearbeitung

2.2.4.3 Mis-Fit-Korrektur

Um einen Datensatz bestehend aus Seismik unterschiedlichster Jahrgänge und Qualität zu harmonisieren, ist es nicht nur sinnvoll eine einheitliche Datenverarbeitungssequenz zu verwenden, es muss insbesondere an den Profilkreuzungspunkten eine Anpassung erfolgen. Die sog. Mis-Tie Korrektur. Als Mis-Tie wird der Unterschied eindeutig zuordenbarer Reflektionen an einem Profilkreuzungspunkt bezeichnet. Dieser Unterschied kann durch visuellen Vergleich oder mit Hilfe einer Korrelationsfunktion bestimmt werden. Grundsätzlich ist dabei zwischen zwei Arten von Mis-Ties zu unterscheiden für die beide eine Korrektur erfolgen muss, bevor eine Interpretation als Risswerk abgebildet werden kann. Das sind zum einen der statische Mis-Tie und zum anderen der Migrations-Mis-Tie.

Die statischen Mis-ties sind reflexionszeitinvariant und verursachen normalerweise einen sog. Bulk shift bzw. Blockverschiebung. Es sollte darauf geachtet werden, dass zur Bestimmung des Verschiebungswertes nur sählig gelagerte Reflexionen verwendet werden. Erhöhte Neigungsraten können zum Migrations-Mis-Tie führen. Ein Effekt der dadurch entsteht dass eine dreidimensionale Struktur mittels zweidimensionaler Seismik abgebildet wird. Dies hat zur Folge, dass die gewählten Kreuzungspunkte zwar an der Oberfläche nicht aber im Untergrund übereinstimmen müssen. Diesen Effekt zu kompensieren ist ungleich schwerer, vor allen Dingen wenn eine Überlagerung beider Effekte vorliegt. Eine statische Mis-Tie Analyse sollte daher in unmigrierten gestapelten Sektionen durchgeführt werden um diese Problematik möglichst zu vermeiden. Die Mis-Tie Analyse ist aber nicht Bestandteil der Datenverarbeitung sondern ein wichtiger Arbeitsschritt in der Interpretation und somit nicht Bestandteil dieser Begutachtung.

Die Tiefbohrungen und die zahlreichen Aufzeitmessungen der Akquisitionskampagne des Winters 2011/12 wurden als Referenzpunkte gewählt und es wurde beginnend im Osten eine Analyse und Korrektur durchgeführt. Durch diese im Rahmen der Interpretation durchgeführte Mis-Tie-Analyse wurde die Notwendigkeit erkannt lokale Statikkorrektur-Anpassungen vorzunehmen. Diese Korrektur, die sowohl beim Reprocessing, aber insbesondere zwischen den Profilen der neuen Messkampagne und den reprozessierten Profilen durchgeführt wurde, wird in der Bearbeitungssequenz als Mis-Fit-Korrektur bezeichnet und ist umfassend dokumentiert.

Die aus der Analyse resultierenden Zeit-Korrektur Werte wurden DMT-Petrologic GmbH zur Verfügung gestellt und die Korrektur erfolgte dann in der Pre-Stack Domäne. Dies stellt gegenüber einer Anpassung in der Post-Stack-Domäne das weitaus komplexere aber oberflächenkonsistente Vorgehen dar. Verschiebungswerte bzw. Zeitunterschiede, die an Profilkreuzungspunkten bestimmt wurden, werden auf die Statikkorrektur von Schüssen und Empfängern gleichermaßen verteilt. Dies ist vor allen Dingen für Vibro-Seismik ein legitimes Vorgehen, da hier Empfänger und Schuss die gleiche oberflächennahe Bezugsebene besitzen, d.h. prinzipiell die gleichen statischen Korrekturen erfahren sollten. Das Vorgehen verlangt sowohl ein detailliertes Wissen der verwendeten Akquisitionsparameter und Geometrie als auch Erfahrung in der Anwendung des Verfahrens, was beides vorausgesetzt werden kann. Da anschließend an die Korrektur noch eine Reststatikbearbeitung folgt, führt das Verfahren zudem zu keinem Verlust der Abbildungsqualität.

Neben der Berücksichtigung der Referenzpunkte bei der Korrektur wurde auch die unterschiedliche Qualität der vorhandenen Seismik-Datensätze berücksichtigt. Das dokumentierte Vorgehen zur Anpassung der Seismik an Profilkreuzungspunkten zeigt das Bemühen im Rahmen der Datenverarbeitung einen bestmöglichen Datensatz zur struktureologischen Interpretation zu generieren.

Allerdings kommt es bei einem in den Unterlagen dokumentierten Profil zu einer Veränderung der Reflektorgestalt nach der durchgeführten Korrektur. Abbildung 2-7 zeigt einen Ausschnitt des Profils bis ca. 1 sec. Zwischen der CDP-Position 5600 und 6500 ist deutlich ein Strukturunterschied in der seismischen Abbildung zu erkennen. Eine moderate Antiklinalstruktur, die bei der PSTM vor der Korrektur abgebildet wird, scheint nach der Anpassung zu verschwinden.

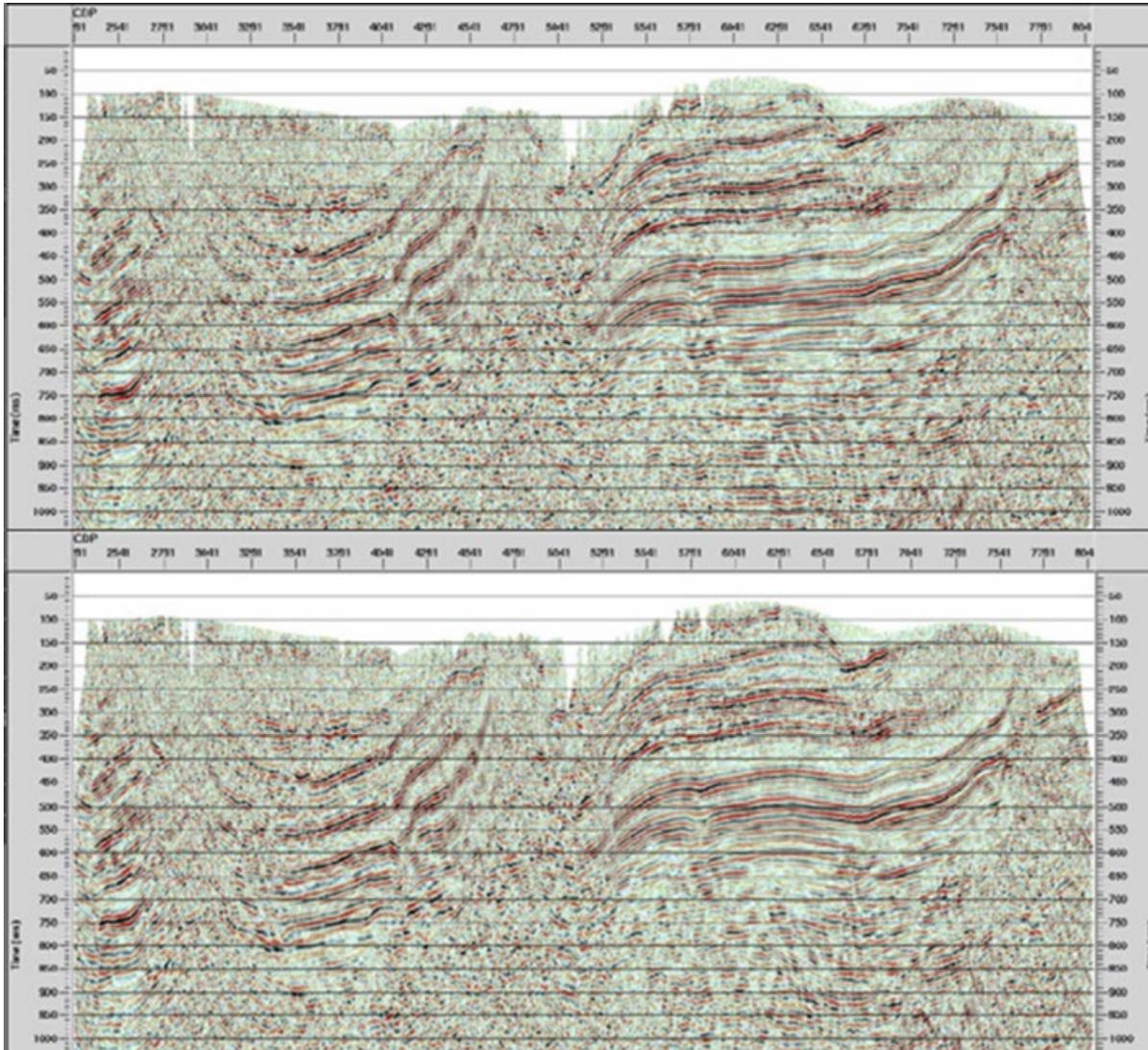


Abbildung 2-7: Ausschnitt aus Profil 11-NS-06; Oben: PSTM nach Mis-Tie Korrektur; Unten: PSTM vor Mis-Tie Korrektur

Dies stellt einen erheblichen Einfluss der Datenverarbeitung auf die strukturelle geologische seismische Abbildung dar und ist ad hoc nicht nachvollziehbar. Unterschiedliche Wetterbedingungen bei der Akquisition oder variierende Grundwasserspiegel, bedingt durch Akquisitionszeitpunkt oder die Zeitspanne zwischen den Akquisitionen könnten die Ursache für den Unterschied in den Reflexionszeiten unterschiedlicher Profile sein. Ohne eine plausible Erklärung stellt der Unterschied im strukturellen Abbild eine Abbildungsunsicherheit dar, die als solches in einer Sensitivitätskarte erfasst werden sollte. Die Datenverarbeitung wird in diesem Bearbeitungsschritt dazu benutzt, eine in der Interpretation für notwendig erkannte Korrektur in der Datenverarbeitung zu kompensieren. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Gesamtlänge des dargestellten Profils über 17km beträgt und es sich deshalb um eine überhöhte Darstellung handelt. Dennoch wäre

es zu prüfen, ob die Anpassung an den Profilkreuzungspunkten mit erhöhten Mis-Ties, zu Ungunsten der tatsächlichen Lage der Reflektoren durchgeführt worden ist und ob die starke Gewichtung von Aufzeitmessungen und Kurzzeitrefraktionsmessungen bei der Mis-Tie Analyse gerechtfertigt ist. Eine Mis-Tie Analyse und eventuelle Korrektur, die zunächst Messkampagnen gebunden durchgeführt wird, bevor eine Analyse im gesamten Messgebiet angefertigt wird, könnte einen Ansatz darstellen, um Fehler an den Kreuzungspunkten zu kategorisieren und besser zu verstehen.

2.2.4.4 **Seismic-to-well-tie**

Neben der visuellen Überprüfung der seismischen Abbildungsqualität unter Berücksichtigung der Kontinuität seismischer Reflektoren und klar detektierbarer Störungen, bietet der Well-to Seismic-Tie die Möglichkeit die Abbildungsqualität an einer Bohrlokation zu überprüfen. Hierzu wird aus vorhandenen Bohrlochmessungen ein akustischer Impedanz-Log generiert und daraus ein synthetisches Seismogramm, d.h. eine seismische Spur entlang des Bohrpfads berechnet, die nun direkt mit der aufgezeichneten Seismik verglichen werden kann. Dies wurde für alle Bohrungen im Rahmen der Datenverarbeitung durchgeführt und dokumentiert. In Abbildung 2-8 sind beispielhaft die synthetischen Seismogramme der Bohrung Waiach und die Profillinie 91-NO-75, die über die Bohrungslokation akquiriert wurde dargestellt. Es sind zwei synthetische Seismogramme zu sehen; zum einen eine seismische Spur generiert von der Firma DMT Petrologic GmbH und zum anderen von der Nagra. Die gute Korrelation von Bohrung und Seismik über einen weiten Abschnitt der Daten ist gut sichtbar.

Wenn auch nicht alle synthetischen Seismogramme dieselbe Qualität aufweisen, ist die Korrelation über einen Großteil der vorhandenen Daten sehr gut und vermindert damit die Unsicherheit der strukturgeologischen Interpretation. Die Korrelation zeigt letztlich den lithologischen Informationsgehalt der Seismik und liefert wichtige Details über die vertikale Auflösbarkeit der vorhandenen akquirierten und prozessierten seismischen Daten.

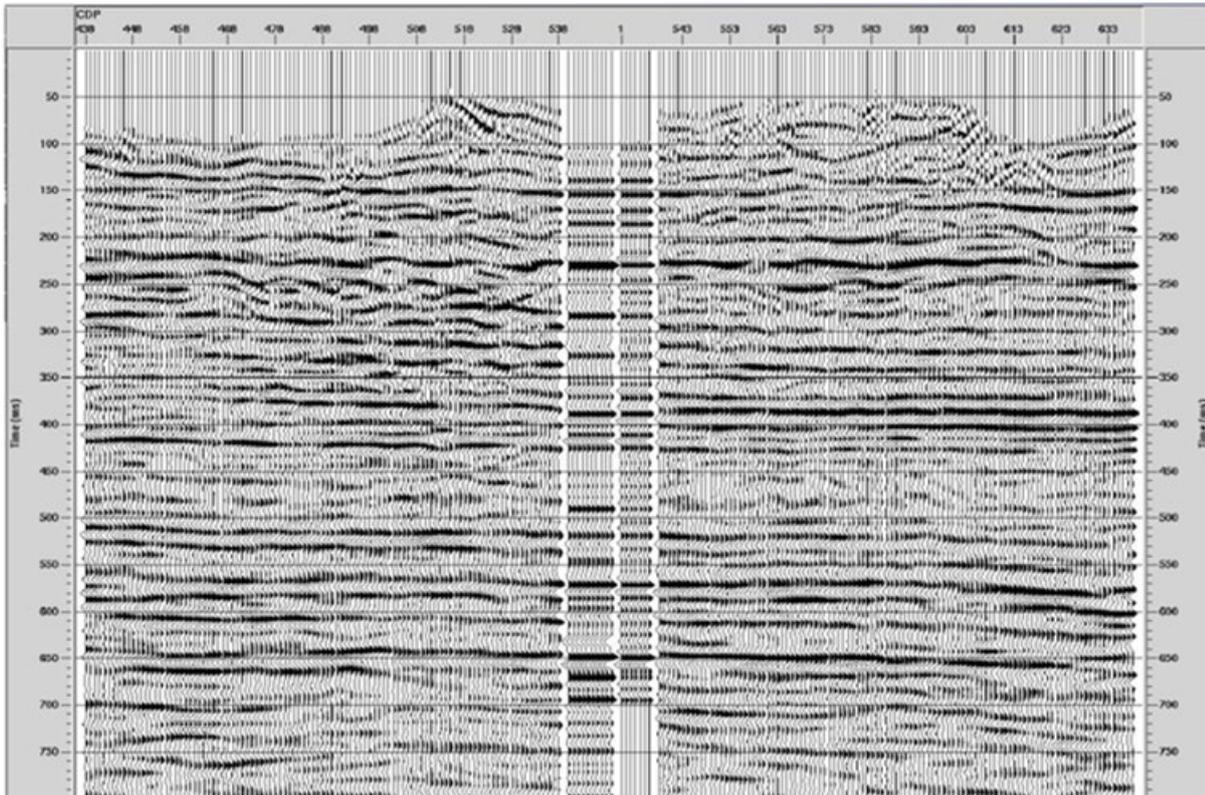


Abbildung 2-8: Die Bohrung Weiach auf der Profillinie 91-NO-75. In der Mitte sind die synthetischen Seismogramme der Firma DMT Petrologic und der Nagra zu sehen (nach einer statischen Korrektur von +8 ms).

2.2.5 Sensitivitätsanalyse

Die in Tabelle 2-3 dargestellt und in der Datenverarbeitung verwendete Bearbeitungssequenz lässt es nicht zu, eine mögliche Unsicherheit hinsichtlich der seismischen Abbildung direkt abzuleiten. Mögliche Ungenauigkeiten z.B. in der Geschwindigkeitsanalyse, die sich auf Lage und Gestalt der Reflektoren auswirken, können im seismischen Abbild nicht eindeutig zugeordnet werden. Dies trifft aber nicht nur auf die verwendete Bearbeitungssequenz zu, sondern gilt generell für alle kommerziell angebotenen seismischen Bearbeitungssequenzen. Darüber hinaus liegt hier zur Auswertung ein 2D-Seismik-Datensatz vor, der alleine durch seine Geometrie eine Unzulänglichkeit bei der strukturellen Abbildung darstellt. Die 3D Seismik Benken würde hier vielleicht die Möglichkeit bieten, eine Abschätzung der Lageunsicherheit durchzuführen, da dieses Gebiet ebenfalls mit 2D-Seismik überdeckt ist. Ein Vergleich einer nur auf 2D Daten durchgeführten Interpretation mit einer Bearbeitung die mit Hilfe der 3D Daten erstellt wurde könnte einen Anhaltspunkt geben, wie sich die limitierte Akquisitionsgeometrie sich auf die Positionierung der seismischen Reflektoren im Untergrund auswirkt. Auch hinsichtlich der Detektierbarkeit von Störungen wäre ein Vergleich u.U. sinnvoll. Aspekte der Kontinuität und Auflösbarkeit und deren Korrelation könnten Gegenstand einer Studie darstellen. Allerdings muss die Übertragung möglicher Schlüsse auf andere Gebiete des Untersuchungsgebiets mit Bedacht durchgeführt werden, da Geologie und auch Qualität, der zur Verfügung stehenden Seismik variieren können. Dies ist aber nicht Bestandteil der seismischen Datenverarbeitung und daher nicht Gegenstand der zu begutachtenden Arbeit.

Wie in Tabelle 2-3 mit der Codierung P dargestellt, liefert die durchgeführte Bearbeitungssequenz mehrere Ausgabeprodukte, und zusammen mit den Geschwindigkeitsinformationen aus Stapelung und Pre-Stack-Bearbeitung steht ein umfangreicher Datensatz zur Verfügung, der zur Abschätzung von möglichen strukturell geologischen Lagefehlern benutzt werden kann. Dies setzt aber eine Konvertierung von Zeit in Tiefe voraus. Die Möglichkeiten reichen hierbei von der Map-Migration, über Image Ray-Migration, bis hin zur simplen Teufenstreckung. Die unterschiedlichen Verfahren sind abhängig von den Eingangsdatensätzen. Darüber hinaus wird in der Literatur beispielsweise ein Verfahren beschrieben, wie mittels Map-Migration eine Korrektur der auf 2D-Seismik basierenden Auswertung erfolgen kann (Whitcombe und Carroll 1994). Die Track-Line-Construction (Sattelgger und Egbers 1987) führt diese Korrektur auf den seismischen Profilitern durch. Neben den unterschiedlichen methodischen Tiefenkonversionansätzen stehen hier zusätzlich Geschwindigkeitsinformationen aus Tiefbohrungen und/oder aus der Bearbeitungssequenz (z.B. Stapelgeschwindigkeiten) zur Verfügung und können auf unterschiedlichste Weise integriert und kombiniert werden.

Durch die verschiedenen Ansätze und die daraus resultierenden Teufenkarten ergibt sich die Möglichkeit einen Modelraum zu beschreiben, indem sich voraussichtlich die wahre Lösung der geologisch-strukturellen Abbildung befindet. Das oben angedeutete Vorgehen stellt damit den Versuch dar, Fehlergrenzen zu beschreiben. Die Tiefenmigration, die ebenfalls von der Nagra durchgeführt wird, aber nicht Gegenstand der Begutachtung ist, stellt in dieser Überlegung nur eine weitere Methode dar. Unzulänglichkeiten, die sich aus einer 2D-Seismik basierten Interpretation ergeben, werden durch ein mutmaßlich verbessertes Abbildungsverfahren nicht gelöst. Die Problematik von Dip- und Strike-Line-Migration und dem daraus resultierenden Mis-Tie an Profilkreuzungspunkten wie Abschnitt 2.2.4.3 beschrieben bleibt erhalten und kann beispielsweise nur in der unmigrierten gestapelten Domäne zufriedenstellend gelöst werden.

Eine Abschätzung der Fehlergrenzen sollte aber immer in Übereinstimmung mit der tatsächlichen Fragestellung, die durch die Seismik und deren Interpretation beantwortet werden soll geschehen. Anders formuliert: Muss eine kleinräumige, strukturelle Veränderung mit möglichst geringer Unsicherheit abgebildet werden, oder reicht es, großräumige strukturelle Integrität mit der Bearbeitung und Interpretation darzustellen? Im zweiten Falle wäre ein Vorgehen, wie oben beschrieben nicht zielführend. Der ausgeführte Gedanke lässt sich auch auf die in Abschnitt 2.2.4.3 erwähnte Überarbeitung der Analyse an Profilkreuzungspunkten ausweiten.

2.2.6 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung und Projektkontrolle erfolgte mitunter über regelmäßige und dokumentierte Arbeitstreffen in Hannover bei der Firma DMT Petrologic GmbH. Dieses Vorgehen gewährleistet die Möglichkeit, Entscheidungen nach bzw. mit Dateneinsicht zu fällen und ist hinsichtlich der Projektkontrolle positiv zu bewerten.

Darüber hinaus ist die vorliegende Dokumentation [(DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk 2013) & (Petrologic -G. Rybarczyk 2012)] über die durchgeführten Arbeiten sehr ausführlich und übersteigt bei weitem das in der Industrie geforderte Maß. Alle Bearbeitungsschritte sind dokumentiert und erlauben eine nachträgliche Kontrolle der durchgeführten Arbeit.

2.3 Teilaspekt seismische Datenverarbeitung in Tiefe

2.3.1 Resümee

Die Begutachtung der Berichte und die angewendete Bearbeitungssequenz zeigen, dass das Hauptziel der Bearbeitung der Seismik in Tiefe das Erstellen eines geologischen Tiefenmodells ist. Die zur Verfügung stehenden Bohrungen dienen dabei als wichtige Stützstellen. Die Kohärenz des finalen Modells an genau diesen Punkten wird bei der Bearbeitung als wichtigstes Gütemerkmal angesehen. Die tomographische Geschwindigkeitsanalyse, die bei der Migration zur Anwendung kommt, wird kombiniert mit einer aufwendigen Anpassung des Geschwindigkeitsmodells, um eine Übereinstimmung der seismischen Abbildungen an den Bohrungen und Profilkreuzungspunkten zu erreichen. Dieses Verfahren ist hinsichtlich des vorgestellten Ergebnisses angemessen, sehr sorgfältig durchgeführt worden und ausreichend dokumentiert. Unverständlich erscheint allerdings die Tatsache, dass die Profillinien der seismischen Akquisitionskampagne aus den Jahren 2011/12 dabei nicht im gleichen Maße berücksichtigt wurden. Dies wirkt sich letztendlich auch auf die Bestimmung der Unsicherheiten aus.

Bearbeitungsschritte, die bereits bei der Datenverarbeitung in Zeit (siehe Kapitel 2.2 bzw. DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk (2013)) zur wesentlichen Verbesserung der Qualität geführt haben, bilden nun auch hier die Grundlage zu den in der Qualität vergleichbaren Abbildungsergebnissen, die mittels der Tiefenmigration erzielt wurden.

Der verwendete Ansatz zur Beschreibung der Unsicherheiten resultiert in einer sehr konservativen Abschätzung, die die Qualität der vorliegenden Bearbeitung nicht widerzuspiegeln scheint. Basierend auf der Erfahrung wirkt die berechnete Unsicherheit zu groß, insbesondere wenn man die hervorragende Tiefenprognose der Bohrung Benken berücksichtigt. Die Möglichkeit einer eventuellen fehlerhaften Schlussfolgerung, bedingt durch eine zu groß gewählte Unsicherheit und den damit verbundenen unterschiedlichen Teufenangaben, sollte deshalb diskutiert und ausgeschlossen werden. Dies scheint aber nur eine Problematik darzustellen, wenn die Mächtigkeiten einzelner lithologischer Einheiten aus der Bearbeitung abgeleitet werden.

Ausgehend von der Durchsicht der zur Verfügung gestellten Dokumente, welche die Bearbeitung der 2D-Seismik-in-Tiefe beschreiben und die Diskussion im Rahmen des Review Prozesses mit DMT Petrologic zum Thema Processing kann davon ausgegangen werden, dass die im Rahmen der Datenverarbeitung durchgeführten Arbeitsschritte sorgfältig durchgeführt wurden.

2.3.2 Einleitung

Im Rahmen der Etappe 2 des Sachplans geologisches Tiefenlager (SGT) müssen die Kenntnisse über die Standorte die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich erlauben. Einen wichtigen Bestandteil dieses Untersuchungsprogrammes bildet der zur Verfügung stehende reflexions-seismische 2D-Datensatz.

Dieser Datensatz, der die Grundlage für die regionale strukturgeologische Interpretation darstellt, besteht zum einen aus den im Winter 2011/2012, im Auftrag von der Nagra akquirierten 2D seismischen Profilen und zum anderen aus reprozessierten 2D-Seismik Daten, die im Messgebiet zwischen den Jahren 1979 und 1996 aufgezeichnet wurden.

2.3.2.1 Vorgehen

Entsprechend der Wichtigkeit der 2D-Seismik Resultate setzt das ENSI zur Beurteilung der eingereichten Arbeiten bezüglich der 2D-Seismik externe Experten ein. Hierbei wird eine thematische Trennung, basierend auf der Expertise der Experten, zwischen der Beurteilung der durchgeführten seismischen Datenverarbeitung und der Begutachtung der vorliegenden strukturgeologischen Interpretation eingeführt.

2.3.2.2 Prüfungsschwerpunkte

Begutachtungsgegenstand dieses Berichts ist die seismische Datenverarbeitung. Die Beurteilung des zur Interpretation verwendeten Seismik-Datensatzes erfolgt in zwei Schritten: Schritt 1 (Kapitel 2.2) des Review-Prozesses, welches sich auf die Datenverarbeitung und Interpretation in der Zeit-Domäne konzentriert wurde bereits in April 2014 abgeschlossen. Schritt 2 (Kapitel 2.3) befasst sich mit der Datenverarbeitung und Interpretation in der Tiefen-Domäne. Die vorliegende Stellungnahme hat ausschließlich die geophysikalische Datenverarbeitung in Tiefe als Begutachtungsschwerpunkt.

Für die Beurteilung der Unterlagen zur seismischen Datenverarbeitung in Tiefe stehen insbesondere folgende Aufgaben und Fragestellungen im Vordergrund (Kapitel 1.3):

- Frage 1:** Entsprechen die durchgeführten Arbeiten und die angewandten Techniken dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik bzw. sind sie stufengerecht.
- Frage 2:** Erfolgte die Erarbeitung der Unterlagen und die seismische Datenverarbeitung mit der notwendigen Sorgfalt und Qualitätssicherung
- Frage 4.1:** Sind die Bearbeitungsschritte der Datenverarbeitung nachvollziehbar und mit der nötigen Sorgfalt hinsichtlich der gegebenen Fragestellung ausgeführt worden
- Frage 4.4:** Sind die Ungewissheiten und Unsicherheiten in der gesamten 2D Datenverarbeitung ausreichend spezifiziert?

2.3.2.3 Beurteilungsgrundlage

Die Berichte NAB13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014), NAB 14-34 (Meier, et al. 2014) und Nagra (2012a) (Petrologic -G. Rybarczyk 2012) und die entsprechenden Beilagen stellen hierzu die zentralen Begutachtungsunterlagen dar. Im Rahmen eines Review Meetings am 30. März 2015 bei DMT Petrologic in Hannover, wurden zusätzlich einzelne Schritte der Datenverarbeitung detailliert vorgestellt und diskutiert. Darüber hinaus bilden die in Schritt 1 durchgeführte Beurteilung (Kapitel 2.2) und die daraus gewonnenen Erkenntnisse eine wesentliche Grundlage zur hier vorliegenden Begutachtung der Datenverarbeitung in Tiefe.

2.3.2.4 Aufbau der vorliegenden Stellungnahme

Aus Sicht des Berichterstatters ist es von primärer Bedeutung, die hier eingesetzten Methoden und Bearbeitungsschritte mit der für diese Aufgabenstellungen standardisierten Bearbeitungssequenzen zu vergleichen und Unterschiede oder Abweichungen besonders zu dokumentieren. Darüber hinaus wird versucht die Qualität der durchgeführten Arbeit anhand der vorliegenden Dokumentationen und Berichten zu beurteilen.

2.3.3 Datenverarbeitung

2.3.3.1 Bearbeitungssequenz

Wie schon die Zeitmigration wurde auch die Tiefenmigration von der Firma DMT Petrologic GmbH in Hannover durchgeführt. Die Tatsache, dass die Tiefenmigration vom selben Kontraktor wie die Bearbeitung der Seismik in Zeit (DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk 2013) durchgeführt wurde stellt die Kontinuität in der Bearbeitung sicher. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das im ersten Bearbeitungsschritt erworbene geologische Verständnis der Region und die für die Bearbeitung wichtige Kenntnis über die Besonderheiten des vorliegenden seismischen Datensatzes in der Tiefenbearbeitung berücksichtigt wurden. Dies ist als positiv zu bewerten.

Das Ablaufdiagramm, das die grundsätzliche Bearbeitungssequenz zeigt ist in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) in Abschnitt 4 dargestellt. Allerdings wird die dargestellte Bearbeitungssequenz nur auf die älteren Profillinien angewandt. Diese Bearbeitung ist in Nagra (2012a) (Petrologic -G. Rybarczyk 2012) dokumentiert. NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) dient zur Dokumentation der in den Jahren 2011/2012 von der Nagra akquirierten Daten.

Als Eingabedatensatz werden sog. CRS-Gather benutzt. Das hierzu verwendete Verfahren ist die CRS-Stapelung [e.g. (T. Müller 1999) & (Hertweck, Schleicher und Mann 2007)]. Die Technologie der CRS-Gather geht auf die Arbeit von Baykulov [(Baykulov 2008), (Baykulov 2009)] zurück und benutzt die CRS-Technologie um Eingangsdaten für eine Pre-Stack Migration zu erzeugen. Wie schon in der Beurteilung der Datenverarbeitung in Zeit (Kapitel 2.2) ausgeführt, handelt es sich hierbei nicht um ein Standardverfahren. Aufgrund der existierenden positiven, publizierten und dem Autor bekannten Datenverarbeitungsergebnissen und der teilweise verbesserten Abbildung in der Zeitmigration, kann davon ausgegangen werden, daß der Einsatz der CRS Technologie auch bei der Bearbeitung in Tiefe u.U. ein Vorteil, aber auf keinen Fall einen Nachteil darstellt. Der in der Dokumentation fehlende Vergleich zwischen Standard- und CRS-Bearbeitung bei der Tiefenmigration ist deshalb nicht von Bedeutung.

Die Erstellung des Geschwindigkeitsmodells, welches eines der Kernelemente einer Tiefenmigration repräsentiert, wurde mit dem Landmark Processing Software-Paket ProMax MVA TM durchgeführt. Das verwendete Verfahren ist ein horizontgebundenes iteratives tomographisches Geschwindigkeitsanalyseverfahren und stellt eine zeitgemäße und adäquate Standardbearbeitung dar. Die Processing Software ProMax MVA TM wird auch von anderen seismischen Datenverarbeitungscontractoren kleinerer und mittlerer Größe verwendet. Die Festlegung der Horizonte zur Geschwindigkeitsanalyse wurde in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber durchgeführt und gegebenenfalls an die Komplexität der geologischen Verhältnisse angepasst. Das lässt wiederum auf eine angemessene und gute Qualitätssicherung von Seiten der Nagra schließen

Das tatsächliche seismische Abbild in Tiefe wurde mit einem sog. Kirchhoff Migrationsalgorithmus berechnet. Obwohl es heutzutage modernere Verfahren gibt, die ein besseres Abbild versprechen würden, hat das hier verwendete Abbildungsverfahren aufgrund seiner Robustheit und stabilen Qualität seine Berechtigung und ein Mehrwert durch ein weiter- bzw. hochentwickeltes Abbildungsverfahren hinsichtlich der zu beantwortenden Fragestellung ist zweifelhaft.

Seismische Anisotropieeffekte, wie sie beispielsweise von Thomsen (Thomsen 2002) beschrieben werden, wurden bei der Migration bzw. bei der Erstellung des Geschwindigkeitsmodells nicht

berücksichtigt. Dies ist in diesem Zusammenhang besonders erwähnenswert, da gerade bei Tonschichten, die ja in diesem Fall das Target darstellen, von verstärkten Anisotropieeffekten ausgegangen werden kann. Darüber hinaus wird seismische Anisotropie in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) als mögliche Fehlerquelle erwähnt. Geht man aber davon aus, dass sich der nicht berücksichtigte Anisotropieeffekt hauptsächlich in einer falschen Teufenansprache im Migrationsergebnis niederschlägt und im Restmoveout der migrierten Gather schwer bis gar nicht zu bestimmen ist, wirkt sich der Ansatz einer isotropen Migration nicht negativ aus. Dem Effekt der fehlerhaften Tiefenlage wurde bei der Bearbeitung durch Anpassung des Geschwindigkeitsmodells versucht Rechnung zu tragen. Des Weiteren könnte eine falsche Teufenansprache ihren Ursprung auch durch die Problematik der „Out-of-Plane“-Reflektionen haben. Eine Korrektur basierend ausschließlich auf einem Anisotropieeffekt wäre daher ebenfalls nicht korrekt.

Eine Bearbeitung unter Berücksichtigung seismischer Anisotropie sollte aber unbedingt bei der zukünftigen Datenverarbeitung von 3D Seismik zur Anwendung kommen. Zusätzlich sollte bei der Bearbeitung zukünftiger seismischer 3D-Daten über die Anwendung einer Full-Waveform-Inversion nachgedacht werden. Dieses Verfahren besitzt das Potential mit Hilfe der seismischen Daten hochauflösende Geschwindigkeitsfelder zu generieren. Die geringe Tiefe der zu untersuchenden Gesteinsschichten könnte dabei von Vorteil sein.

2.3.3.2 Implementierung

Die im Abschnitt 4 in NAB 13-80 im Ablaufdiagramm aufgeführten wesentlichen Arbeitsschritte sind methodisch erklärt, und die im Rahmen dieser Beurteilung zugänglichen Berichte und Präsentationen lassen auf eine sorgfältige Bearbeitung schließen.

Das Startmodell, das für die tomographische Geschwindigkeitsanalyse diente, wurde aus einem regionalen 3D Geschwindigkeitsmodell abgeleitet, das zu einem früheren Zeitpunkt zur Tiefenkonvertierung benutzt wurde. Mittels eines sog. Plausibilitätschecks wurde das Modell den bekannten gegebenen geologischen Bedingungen angepasst.

Dieses Vorgehen schränkt den möglichen Ergebnisraum einer tomographischen Geschwindigkeitsanalyse ein und ist sehr vom Modell- und wenig von den seismischen Daten gesteuert; gewährleistet allerdings ein schlüssiges Migrationsergebnis an Bohrungslokalationen. Wünschenswert wäre ein Vergleich der Geschwindigkeitsanalyse bei unterschiedlichen Startmodellen an exemplarisch ausgesuchten Profillinien, um eine mögliche Variabilität der Migrationsergebnisse zu dokumentieren und die Sensitivitäten zu beschreiben. Ein typisches Startmodell wird üblicherweise mittels Stapelgeschwindigkeiten der Zeitmigration generiert. Dies gewährleistet, dass die Geschwindigkeitsanalyse ausschließlich Seismik-Daten basiert erfolgt.

Mit den Standardapplikationen Restmoveout-Korrektur, Stapelung, Skalierung und anschließende Tiefen-Zeitkonvertierung (siehe Ablaufdiagramm in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014)) ist die als Tiefenprozessing zu bezeichnende Bearbeitungssequenz abgeschlossen.

Das im Bericht mehrfach erwähnte Depthing Verfahren kann als eine Art vertikale Zeit-Tiefenkonversion angesehen werden und ist ein von der eigentlichen seismischen Datenverarbeitung strikt zu trennender Arbeitsschritt. Al-Chalabi (Al-Chalabi 2015) beispielsweise zeigt den Unterschied zwischen „seismischen“ Geschwindigkeiten, die bei der Migration zur Anwendung kommen und „geologischen“ Geschwindigkeiten, die bei einer Zeit-Tiefenkonvertierung benutzt werden. Dieser ist besonders signifikant, wenn ein isotropes Geschwindigkeitsfeld wie im vorliegenden Fall benutzt wird.

Die klassische seismische Datenverarbeitung in Tiefe unter Berücksichtigung eines mittels der Daten generierten Geschwindigkeitsfeldes, wurde nur auf die älteren Profillinien angewandt. Neuere Profile der Kampagne 2011/2012 wurden bei der Geschwindigkeitsanalyse nicht betrachtet (Meier, et al. 2014) & (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014).

Aus Sicht der seismischen Datenverarbeitung ist dieser Schritt nicht nachvollziehbar und nur zu verstehen, wenn man das Erstellen eines an den Bohrungen und seismischen Kreuzungspunkten passenden Tiefenmodells als wichtigstes Qualitätsmerkmal angesetzt. Das seismische Geschwindigkeitsgesetz, das zur Migration diente, wurde mittels Intra- und Extrapolation an ausgewählten Markerhorizonten aus dem Zeit-Tiefen Konvertierungsmodell abgeleitet, wobei die Profilkreuzungspunkte jeweils als Stützstellen dienten. Nach Migration wurde lediglich eine Restmoveout-Korrektur durchgeführt. Dies ist eine sehr ungewöhnliche Vorgehensweise im Rahmen einer seismischen Datenverarbeitung mit dem Ziel einer Pre-Stack-Tiefenmigration. Die in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) Anhang A2 dokumentierte Restmoveout-Korrektur dreier seismischer Profillinien (Profil 12-NS-75, Profil 12-NS-42 und Profil 11-NS-08) zeigt ein teilweise erheblich verbessertes Migrationsergebnis. Dies veranschaulicht zum einen die erfolgreiche und notwendige Implementierung des Korrekturverfahrens, weist aber andererseits auch auf die Unzulänglichkeiten des benutzten Geschwindigkeitsmodells hin. Bei einer wie hier angewandten Restmoveout-Korrektur handelt es sich lediglich um eine „kosmetische“, nicht aber modellbasierte Anpassung, die die seismischen Daten zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes benutzt.

Um eine mögliche Verschlechterung, der Bearbeitungs- bzw. Migrationsergebnisse auszuschließen kann ein visueller Vergleich mit den Zeitmigrationsergebnissen (DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk 2013) herangezogen werden. Eine Gegenüberstellung kann hierbei in dergleichen Abbildungsdömane durchgeführt werden, was einen visuellen Abgleich wesentlich vereinfacht. Die in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) in Anhang 3 dargestellten Migrationsergebnisse zeigen, dass die Qualität gleich bleibt und damit die ungewöhnliche Vorgehensweise zu keinem defizitären Ergebnis führt. Die unterschiedlichen Amplitudenstärken einzelner Horizonte, die im Vergleich der Zeit- und Tiefenmigration zu beobachten sind, stellen kein Qualitätsmerkmal dar, da in erster Linie die Abbildungsqualität, nicht jedoch dynamische Effekte betrachtet werden.

2.3.3.3 Zeit-Tiefen-Konvertierung

Die Erstellung des Zeit-Tiefen-Modells wurde im Anschluss an die PSDM-Bearbeitung durchgeführt. Ziel des als Depthing bezeichneten Verfahrens ist es, Teufenunterschiede an Stützstellen zu reduzieren bzw. zu eliminieren. Als Stützstellen dienen Bohrungslokationen und Profillinienkreuzungspunkte. Diese Anpassung wurde technisch aufwendig und sehr sorgfältig durchgeführt. Diese Bearbeitung wurde nicht auf die seismischen Daten der Akquisitionskampagne 2011/12 angewandt.

Zunächst sei erwähnt, dass ein Teufenunterschied zwischen Bohrungsergebnis (d.h. tatsächlich erbohrter Teufe) und Tiefenmigrationsergebnis den Normalfall darstellt, insbesondere wenn eine isotrope Migration durchgeführt wird. Die Unterschiede stellen kein Güte Merkmal für die Qualität der Tiefenmigration dar.

Die Bohrungslokationen sind die einzigen Randbedingungen, bzw. Stützstellen, die eine verlässliche Tiefeninformation darstellen. Sie in das Erstellen eines Zeit-Tiefenmodells einzubinden ist

demzufolge das richtige Vorgehen. Anders verhält es sich mit Profilkreuzungspunkten, da hier auch die Untergrundsgeometrie eine Bedeutung hat und Tiefenunterschiede nicht zwangsläufig auf Geschwindigkeitsfehler zurückzuführen sind. Die damit verbundenen Sensitivitäten wurden nicht dokumentiert. Zudem setzt das hier verwendete Verfahren voraus, dass der in der Seismik gepickte Horizont exakt der lithologischen gesuchten und abzubildenden Schichtgrenze entspricht, dies muss nicht zwangsläufig der Fall sein.

Geht man davon aus, dass die Generierung eines konsistenten 3D Geschwindigkeitsmodells das primäre Ziel der Tiefenbearbeitung ist, so stellt das in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) Abschnitt 2.2. Generierung der Depthing Modelle im Reprozessing 2009-2011 ein geeignetes Verfahren dar, um bohrungsbasierte Tiefeninformationen mittels seismischer Geschwindigkeiten, die im Rahmen der Pre-Stack-Migration ermittelt wurden, flächenhaft zu extra- bzw. zu interpolieren. Die in Anhang 1 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) dargestellten Bohrungskorrelationen zeigen die gute Anpassung nach Zeit-Tiefenkonversion an den Stützstellen und weisen damit auf die gute Umsetzung des Verfahrens hin.

2.3.3.4 Zusammenfassung

Die durchgeführte Pre-Stack-Tiefenmigration mit der im NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) bzw. Nagra (2012a) (Petrologic -G. Rybarczyk 2012) dargestellten Ablaufdiagramm, entspricht einer dem Standard entsprechenden, zeitgemäßen Bearbeitungssequenz, insbesondere bei der Datenverarbeitung 2 D-seismischer Profillinien. Unverständlich bleibt die Tatsache, warum diese Arbeitsschritte nicht auf die gesamten zur Verfügung stehenden Profile angewandt wurden. Profillinien der seismischen Akquisitionskampagne 2011/12 wurden zwar migriert, aber der wichtige Schritt des seismisch-datenbasierten Erstellens eines Geschwindigkeitsfeldes (Migration-Velocity-Analysis) wurde ausgelassen. Basierend auf den im Rahmen dieser Begutachtung zugänglichen Informationen führt dieses Vorgehen nicht zu einer Verschlechterung des Migrationsergebnisses hinsichtlich der Abbildungsqualität.

Es zeigt sich deutlich, dass mit der Bearbeitung der Seismik in Tiefe primär das Ziel verfolgt wurde, ein auf den gesamten Untersuchungsbereich ausgedehntes Tiefenmodell zu erzeugen. Die Bestimmung eines Geschwindigkeitsmodells zur Zeit-Tiefenkonvertierung spielt dabei die zentrale Rolle. Zum einen wird dies erreicht durch eine (seismische) datenbasierte Geschwindigkeitsanalyse und zum anderen durch das als Depthing bezeichnete Verfahren. Hierbei wird mittels Stützstellen das gegebene Geschwindigkeitsfeld manuell angepasst, bzw. interpoliert. Durch den gewählten Ansatz wird versucht zwei Geschwindigkeitsinformationen zu verbinden. Zum einen die aus den Bohrungen mittels Bestimmung von Zeit-Tiefenpaaren abgeleiteten Intervallgeschwindigkeiten, zum anderen das direkt aus den gemessenen seismischen Daten berechnete Migrationsgeschwindigkeitsfeld. Dies ist grundsätzlich möglich und richtig. Der im Rahmen der Seismik-Bearbeitung in Tiefe (siehe NAB 13-80) gewählte Ansatz entspricht allerdings nicht den Arbeitsabläufen, die gewöhnlich in der E&P-Industrie angewandt werden. Al-Chalabi (Al-Chalabi 2014) gibt hierzu eine umfangreiche Übersicht der möglichen Bearbeitungssequenzen. Dabei werden unterschiedlichste Methoden der Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern mit dem Ziel einer Zeit-Tiefenkonvertierung beschrieben und die Vor- und Nachteile beleuchtet. Es erfolgt jedoch im Vergleich zur hier angewandten Methode, bei allen dort dargestellten Verfahren eine deutlichere Trennung zwischen bohrungsbasierten Geschwindigkeiten und Geschwindigkeiten, die im Rahmen einer Tiefenmigrationsbearbeitung ermittelt wurden.

2.3.4 Sensitivitätsanalyse/Beschreibung der Unsicherheiten

Im NAB 14-34 (Meier, et al. 2014) Abschnitt 6.1.2 wird die Abschätzung von Unsicherheiten, des aus der Tiefenbearbeitung generierten Geschwindigkeitsmodells (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) zu Recht als schwierig bezeichnet. Eine darüber hinausgehende umfassende Quantifizierung der Unsicherheit ist daher sicherlich mehr als fragwürdig. Der von den Autoren gewählte Ansatz in Gleichung 4 (Abschnitt 6.1.2) versucht die existierende Ungenauigkeit im Geschwindigkeitsfeld zu quantifizieren, kann aber letztendlich nur eine grobe Abschätzung der Unsicherheit darstellen. Darüber hinaus erscheinen Teile der Gleichung zu simpel formuliert. Der ad hoc gewählte Entfernungsansatz, bei dem die Unsicherheit mit dem Abstand zum Bohrungspunkt korreliert, berücksichtigt beispielsweise nicht die Qualität der migrationsbasierten Geschwindigkeitsinformation, obwohl gerade diese benutzt wurde, um zwischen den Bohrungen zu interpolieren. Die Kenntnis über den Restmoveout, die als Gütemerkmal benutzt werden könnte, bleibt ungenutzt. Einfache Verfahren wie sie z.B. von Jones et al. (Jones, et al. 2015) beschrieben werden, könnten eine Möglichkeit darstellen um die Sensitivitäten der Ergebnisse näher zu beschreiben. Die Tiefenlage des abzubildenden Horizonts könnte ebenfalls als Parameter in die Bestimmung der Unsicherheit eingehen, da von einer Korrelation zunehmender Fehler mit größerer Tiefe ausgegangen werden kann. Bemerkenswert ist überdies die Tatsache, dass bei der Bestimmung der Unsicherheit die Profillinien der Akquisitionskampagne 2011/2012 nicht berücksichtigt werden können. Das dort verwendete Geschwindigkeitsmodell wurde direkt aus dem sog. Depthing-Modell abgeleitet. Die Variable ($V_{avgstart}$ - $V_{avgdepthing}$) wie in Gleichung 4 gefordert kann daher nicht berechnet werden.

Da es nicht die Geschwindigkeiten, sondern die Teufe ausgewählter Markerhorizonte ist, die den eigentlichen Untersuchungsgegenstand darstellen, würde eine Bestimmung der Unsicherheit direkt in Tiefe eine passendere Herangehensweise darstellen. Um die Sensitivitäten einer Tiefenkonvertierung zu prüfen, wäre beispielsweise eine Residuenanalyse an Bohrungen sinnvoll. Hierzu würde eine Zeit-Tiefenwandlung mit Hilfe von sog. Checkshot Geschwindigkeiten aus den Tiefbohrungen durchgeführt werden. Stapelgeschwindigkeiten oder auch Migrationsgeschwindigkeiten könnten dabei zusätzlich als Trend mit Hilfe eines geeigneten (geostatistischen) Griddingverfahrens eingebunden werden. Nach der Konvertierung kann die Teufe bestimmter Markerhorizonte, die mit lithologischen Schichtgrenzen korreliert werden können, an der Bohrung abgegriffen werden. Die sich daraus ergebenden Residuen wären dann ein Maß für die Güte der Zeit-Tiefenwandlung und könnten direkt zur Abschätzung der Unsicherheit benutzt werden. Um eine noch realistischere Bestimmung durchzuführen, wäre das gleiche Vorgehen denkbar mit dem Unterschied, dass nicht alle Tiefbohrungen zur Erstellung des Geschwindigkeitsmodells benutzt werden. Somit wäre es dann möglich genau an diesen Punkten den tatsächlichen Teufenfehler hinsichtlich des verwendeten Modells zu bestimmen. Durch mehrfaches Wiederholen dieses Verfahrens und einer Berücksichtigung immer wieder anderer Bohrungen, könnte eine mögliche Unsicherheit statistisch bestimmt werden. Die Herleitung eines Geschwindigkeitsmodells könnte dabei auch, wie schon oben angedeutet auf andere oder immer wechselnde Weise erfolgen. Voraussetzung ist lediglich, dass lithologische Tiefenangaben an den Bohrungsstützstellen nicht direkt beim Erstellen des Geschwindigkeitsmodells benutzt werden dürfen.

Das in NAB 13-80 (DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk] 2014) beschriebene Verfahren soll damit nicht abgewertet werden. Die von DMT Petrologic durchgeführte Arbeitssequenz stellt den Versuch dar, alle möglichen Geschwindigkeitsinformationen zu verwenden, um ein kohärentes, an den verfügbaren Bohrungen passendes Tiefenmodell zu erzeugen. Durch die Art und Weise

wie die Bohrungen eingebunden werden beraubt sich das Verfahren allerdings der Möglichkeit eine Unsicherheit bzw. mögliche Teufenabweichung tatsächlich mit Werten zu beschreiben. Das resultierende Tiefenmodell kann aber sicherlich als ein Best-Case-Szenario für die Tiefenwandlung betrachtet werden.

Letztendlich müssen aber die Größe der berechneten Sensitivitäten und der subjektive erfahrungsbasierte Eindruck darüber entscheiden, ob die Unsicherheit ausreichend beschrieben wurde, d.h. ist die Unsicherheit ausreichend groß, um alle zum jetzigen Zeitpunkt geologisch vorstellbaren Ergebnisse beschreiben zu können. Die Karte Beilage-6.8 Tiefenungewissheiten am Top Lias zeigt das Ergebnis. Die Fehler werden abhängig von der Entfernung zur Bohrung bis zu +/- 150m. Dies erscheint sehr konservativ und entspricht in manchen Gebieten einem Fehler von ca. 10%, gemessen an der Tiefenlage. Diese Einschätzung wird bestätigt, berücksichtigt man bereits vorliegende Bohrungsergebnisse und vergleicht diese mit den Bohrprognosen die mittels der Auswertung von 2D Daten erreicht wurde. Die unten stehende Tabelle zeigt den Vergleich von Prognose und tatsächlich erbohrter Teufe für die Tiefbohrung Benken (Tabelle 2-5).

Schichtgrenze	Δ (2D)	Tiefenprognose (2D)	Δ (3D)	Tiefenprognose (3D)	Erbohrte Tiefe (m.u.GOK)
	(m)	Kote (m.ü.M.)	(m)	Kote (m.ü.M.)	
Top Malm	17	229	16	201	199
Top Dogger	47	469	47	430	451
Top Opalinuston ¹	80	539	80	510	539
Top Lias	68	654	72	627	652
Top Muschelkalk	90	805	95	796	811
Basis Trias	117	1011	122	977	983

Tabelle 2-5: Vergleich der aus der oberflächenseismischen Daten abgeleiteten Tiefenprognosen (Quelle: Nagra AN 98-234 (Birkhäuser und Roth (ProSeis AG) 1998)).

Die Prognose basierend auf der Seismik ist im Zielbereich Opalinuston nahezu perfekt. Obwohl mit Sicherheit ein Ausnahmeergebnis, zeigt es aber dennoch die Zuverlässigkeit, die mittels der Auswertung und Prognose durch 2D-Seismik Daten erreicht werden kann.

2.3.5 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung und Projektkontrolle von Seiten der Nagra erfolgte mitunter über regelmäßige Arbeitstreffen in Hannover bei der Firma DMT Petrologic GmbH. Dies gewährleistet die Möglichkeit Entscheidungen nach bzw. mit Dateneinsicht zu fällen und ist hinsichtlich der Projektkontrolle positiv zu bewerten. Die geologische Expertise von Seiten der Nagra konnte so bei der Datenverarbeitung berücksichtigt werden.

Die vorliegende Dokumentation über die durchgeführten Arbeiten ist ausführlich. Alle Bearbeitungsschritte sind dokumentiert und erlauben eine nachträgliche Kontrolle der durchgeführten Arbeit.

2.3.6 Fazit

- Die Datenverarbeitung der Seismik in Tiefe wurde, basierend auf den im Rahmen der Begutachtung zugänglichen Informationen technisch sorgfältig durchgeführt.

- Die Dokumentation der Arbeiten durch DMT Petrologic GmbH ist zufriedenstellend und erlaubt das Nachvollziehen der einzelnen Arbeitsschritte.
- Das Verfahren zur Abbildung der seismischen Daten in Tiefe (die sog. Migration) und das Erstellen des Migrationsgeschwindigkeitsmodells wurden mit ausreichender Sorgfalt und mit etablierten Methoden durchgeführt. Unverständlich ist, warum nicht alle vorhandenen Profillinien beim Erstellen des Geschwindigkeitsfeldes (Migration-Velocity-Analysis) berücksichtigt wurden. Basierend auf den im Rahmen dieser Begutachtung zugänglichen Ergebnissen führt dieses Vorgehen aber nicht zu einer Verschlechterung hinsichtlich der Abbildungsqualität. Die Berücksichtigung seismischer Anisotropie wäre wünschenswert gewesen, ist aber nicht von entscheidender Bedeutung und wirkt sich wohl auch nicht negativ auf das Ergebnis aus.
- Der gewählte Ansatz zur Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Tiefenlage ist sehr einfach formuliert und berücksichtigt nur wenige Aspekte, die einen Einfluss auf die zu bestimmende Unsicherheit haben könnten. Eine detailliertere Beschreibung wäre wünschenswert. Dennoch resultiert das Vorgehen in einer sehr konservativen Abschätzung, die ausreichend scheint um mögliche Ungewissheiten zu beschreiben.

2.4 Literaturverzeichnis

- Al-Chalabi. „Imaged Depth Versus True Depth“ Workshop Proceedings, EAGE Madrid, 2015.
- Al-Chalabi, M. Principles of Seismic Velocities and Time-to-Depth Conversion. EAGE, 2014.
- Baykulov, M., Gajewski, D. „Seismic data enhancement with Common Reflection Surface (CRS) stack method“ GEOPHYSICS, Vol. 74, No. 3 2009: V49–V58
- Bergler, S., G. Hoecht, Y. Zhang, and P. Hubral. „Common-reflection-surface stack for common offset: Practical aspects“ 63rd Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended. 2001.
- Birkhäuser, P., und P. Roth (ProSeis AG). „Bohrung Benken: Vergleich der aus den oberflächenseismischen Daten abgeleiteten Tiefenprognosen“ Aktennotiz. 1998.
- DMT-Petrologic GmbH Gerd Rybarczyk. Arbeitsbericht NAB 13-09 Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D Seismik 2011/12 in Zeit. NAB, Nagra, 2013.
- DMT Petrologic GmbH [G.Rybarczyk]. Arbeitsbericht NAB 13-80 Seismische Datenbearbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe. Nagra, 2014.
- Eisenberg-Klein, G., Pruessmann, J., Gierse, G., and Trappe, H. Noise reduction in 2D and 3D seismic imaging by the CRS method. The Leading Edge, 27:258–265, 2008.
- Gierse, G., H. Bezouska-Strozyk, J. Thiessen, und U. Weber. Using CRS Processing to design a sparse 3D Acquisition Geometry. EAGE Extended Abstract, 2007.
- Gierse, G., Trappe, H., Pruessmann, J., Eisenberg-Klein, G., Lynch, J., Clark, D. „Enhanced velocity analysis, binning, gap fill, and imaging of sparse 2D/3D data by CRS techniques“ SEG Annual Meeting. 2009.
- Hertweck, T., J. Schleicher, und J. Mann, „Data stacking beyond CMP“ The Leading Edge, July 2007: 818-827.
- Jones, C.E., J.I. Selva, R. Gosh, und D. Bright. „Enabling Interpreters to Use Seismic Image Uncertainty Measured from Common Image Gathers“ Conference Proceedings, EAGE Madrid, 2015.

- Madritsch, H., et al. Arbeitsbericht NAB 13-10 Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/2012. NAB, Wettingen: Nagra, 2013.
- Meier, B., P. Kuhn, S. Muff, P. Roth, und H. Madritsch. Arbeitsbericht NAB 14-34 Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. Nagra, 2014.
- Müller, N. A., und M. Spinner. „Improving prestack migration with CRS techniques — A case study“ 72nd Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts., 2010.
- Müller, T. The Common Reflection Surface Stack- Seismic Imaging without explicit knowledge of the velocity model. Bad Iburg: Der Andere Verlag, 1999.
- Nagra (2011): Parameteranalyse 2D Seismik 2011 Jura Ost - Nördlich Lägern, Interoil E&P Switzerland AG, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2011
- Nagra (2012a): „Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Nagra (2012b): 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12: Geologische Aufnahme der Aufzeitbohrungen (Teil 1) und Aufzeitmessungen (Teil 2)“ Dr. Heinrich Jäckli AG, DMT GmbH & Co KG, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Nagra (2012c): 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12 Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Nagra (2012d): 2D-Seismik 2011/12 Nordschweiz: Feldbericht, DMT GmbH & Co KG, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Pruessmann, et al. Improved imaging and AVO analysis of a shallow gas reservoir by CRS. The Leading Edge, 23:915–918., 2004.
- Roth, P., H. Naef, und M. Schnellmann, “Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz“, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, NAB 10-39, Wettingen, 2008.
- Sattegger, J. W., und H. Egbers. „Three-dimensional mapping of horizons picked on two-dimensional migrated seismic sections“ 5th Geophysical Conference and Exhibition of the Australian Society of Exploration Geophysicists. Perth , 1987.
- Spinner, M., et al. „Common-Offset CRS for advanced imaging in complex geological settings“ SEG Expanded Abstracts. Las Vegas, 2012.
- Thomsen, Leon. Understanding Seismic Anisotropy in Exploration and Exploitation. Distinguished Instructor Short Course, EAGE, 2002.
- Whitcombe, D., und R. Carroll. „The application of map migration to 2-D migrated data“ GEOPHYSICS, Vol.59. July 1994: 1121-1132.
- Zhang, Y., S. Bergler, and P. Hubral. „ Common-reflection-surface stack for common offset: Theoretical aspects“ 63rd Annual International conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts. 2001.
- . Seismic data enhancement with Common Reflection Surface (CRS) stack method. SEG Extended Abstracts , 2008.

3 Expertenbericht Prof. Dr. F. Wenzel

Bericht zur 2D-Seismik in der Nordschweiz

Expertenbericht zuhanden des
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in Brugg.

Prof. Dr. Friedemann Wenzel
Karlsruher Institut für Technologie
Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)
12. Oktober 2016

3.1 Zusammenfassung

Die wesentlich zu beurteilende Frage ist ob und inwieweit die 2D-Seismik der Nagra in der Nordschweiz geeignet ist, Entscheidungen zur Einengung der fünf möglichen Standortgebiete (Jura-Südfuss, Jura Ost, Nördlich Lägern, Zürich Nordost, Südranden) zu treffen. Die Datengrundlage hierfür sind die Profile der 2011/2012 gemessenen 2D-Seismik sowie die reprozessierten 2D-Seismik-Profile aus den Jahren 1979 bis 1996. Dieser Bericht benutzt die zum 18. Juli 2015 vorhandenen Referenzberichte der Nagra (Kapitel 1.4), die im Weiteren zitiert werden, und bezieht sich auf die vom ENSI definierten Beurteilungsschritte 1 und 2 (Kapitel 1.2).

Das Processing und die Interpretation sind im Wesentlichen nach dem Stand der Wissenschaft und Technik, mit hohem Aufwand und großer Gründlichkeit erfolgt. Die Interpretation wird allerdings teilweise für Aussagen benutzt, die nicht durchgängig nachvollziehbar sind, weil die 2D-Seismik die dafür erforderliche räumliche Auflösung nicht leistet. Das bezieht sich insbesondere auf die Bestimmung der anordnungsbestimmenden Störungen, die wesentlich in die Platzanforderungen eingehen und zum Teil auf die Festlegung der zu meidenden tektonischen Zonen, wo eine räumlich Auflösung unterstellt wird, die so nicht existiert, die aber bei der Bestimmung des Platzangebots relevant ist.

In diesem Bericht sind jetzt auch die Berichte der Nagra auf Grund der Nachforderung des ENSI (insbesondere NAB 16-41) betrachtet worden und ein Abschnitt über die Bewertung der Unsicherheiten in der Tiefenlage des Top Lias Reflektors (TLi) eingefügt.

3.2 Datenakquisition und Datenverarbeitung

Das Reprocessing erfolgte im Zeitraum 2009 bis 2011 mit 68 Linien (1369 km), die zwischen 1979 und 1996 aufgenommen wurden (Nagra 2012a). Diese Profile sind sehr unterschiedlich akquiriert worden: Unterschiedliche Techniken (Schuss, Vibro, Kombination); Überdeckungen von 12- bis 96-fach, CMP-Abstände von 5 bis 25 m; obere Frequenzen (bei Vibro) von 48 bis 120 Hz. Hauptziel des Reprocessing waren:

- Berechnung und Anwendung neuer statischer Korrekturen (kompatibel mit der 2011/2012 Seismik);
- Rauschunterdrückung (kompatibel mit der 2011/2012 Seismik);
- Anwendung der CRS Technik und Zeitmigration.

Processing und Reprocessing wurden bei der gleichen Firma (Petrologic Geophysical Services GmbH, Hannover) mit ProMAX 2D durchgeführt. Ich habe mich davon überzeugt, dass diese Arbeiten sehr sorgfältig durchgeführt und dokumentiert wurden. Die angewandten Verfahren und die benutzte Software entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Die Datenakquisition in 2011/2012 (Nagra 2012b, 20 Linien mit 307 km Länge) erfolgte sehr sorgfältig mit der notwendigen Qualitätskontrolle, insbesondere sind Feldstapelungen (NAB 13-09) zu nennen. Es wurde eine sehr hohe Überdeckung (165- bis 330-fach) erreicht mit CMP-Abständen von 3 und 6 m und Frequenzen typischerweise bis 100 Hz. Das Processing wurde mit großer Sorgfalt durchgeführt und in enger Abstimmung zwischen der beauftragten Firma und dem Auftraggeber durchgeführt.

Das Reprozessieren der vor 2010 verfügbaren seismischen Linien sowie die Feldaufnahme der neuen Linien erfolgten ebenfalls mit großer Sorgfalt und erheblichen Anstrengungen, die Industriestandards deutlich übertreffen. Das bezieht sich insbesondere auf die Editierung verrauschter Spuren, die statischen Korrekturen (Statik-Grundkorrekturen für Schuss- und Geophonpositionen, Reststatik mit Maximum Power Autostatics und drei Reststatik-Iterationen) und die Rausch-Unterdrückung (Airblast-Dämpfung, Oberflächenwellen-Dämpfung, Unterdrückung kohärenten Rauschens). Dynamische Geschwindigkeitsanalysen erfolgten in dichtem 500 m Raster, verschiedene Kombinationen von Stapelung und Migration wurden angewandt: CMP- und CRS-Stapelung, Poststack-Zeitmigration der CRS-Stapelung, Stapelung der Prestack-Zeitmigration und bei den 2011/2012 Daten auch prestack Tiefenmigration, die zu Vergleichszwecken wieder in die Zeit rückverwandelt wurde. Das Prozessing wurde in enger Abstimmung zwischen der durchführenden Firma und dem Auftraggeber durchgeführt. Die Qualitätskontrollen im Feld und beim Processing inklusive der intensiven Interaktion von Nagra und Kontraktoren waren vorbildlich. Gleiches lässt sich bezüglich der Interpretation sagen.

Die Bewertung der Nagra eines deutlichen Unterschieds zwischen den Nordschweizer Standorten und dem Wellenberg ist nachvollziehbar. Trotz zusätzlichen Aufwandes im Prozessing mit CRS-Methodologie (NAB 13-11) erlaubt die komplexe geologische Struktur des Wellenbergs keine zuverlässige Identifizierung des Gesteins und dessen Abgrenzung mit der 2D-Seismik: Die Profile lassen nur sehr kurze korrelierbare Reflektionen erkennen; die im geologischen Modell enthaltene Basisüberschiebung der Axen-Decke ist in der Seismik nicht konsistent sichtbar. Ein Band von Reflektoren, das sich in allen NS-Profilen zeigt und von 0 m im S auf 1000 m im N abfällt, stellt offensichtlich keine fazielle Grenze dar. Insofern wird der Standort Wellenberg im Folgenden nicht weiter diskutiert.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, insbesondere die Informationen über den Horizont TLi (Top Lias, der Basis der Wirtgesteins Opalinuston) in den Nordschweizer Standortgebieten ist im Wesentlichen gegeben, obgleich Einschränkungen zu nennen sind:

Wegen der teilweise lange zurück liegenden Datenakquisition der ‚alten‘ Linien und den damit verbundenen geringeren Überdeckung muss davon ausgegangen werden, dass trotz der Erzielung erheblicher Verbesserungen durch das Reprozessieren die ‚alten‘ Linien tendenziell geringere Qualität aufweisen als die ‚neuen‘. Die Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit ist nicht untersucht worden. Die Standortgebiete weisen unterschiedliche Anteile ‚alter‘ gegen ‚neuer‘ Seismik auf. Zum Beispiel weist der Jura Ost ein doppelt so hohes Verhältnis neuer Profil- zu alten Profil-km auf als Nördlich Lägern. Es bleibt aber festzuhalten, dass mit der 2D-Seismik, so wie sie jetzt vorliegt, ein optimales Ergebnis für die Interpretation erreicht wurde, das nicht mehr verbessert werden kann.

Die Qualität von Reflektoren wurde für den TLi in NAB 14-34, Beilage 6-5, mit Hilfe der Unsicherheiten hinsichtlich der statischen Korrekturen und der Qualität der Interpretation des Horizonts (NAB 13-10, Tab. 4) dargestellt, aber nicht weiter diskutiert, ob bei den unterschiedlichen Qualitäten die Vergleichbarkeit der Standorte gewahrt bleibt. Während die Standorte SR (Südranden), JO (Jura Ost) und JS (Jura Südfuss) eine sehr gute Qualität des Reflektors zeigen ist das für NL (Nördlich Lägern) und ZNO (Zürich Nordost) nur noch eingeschränkt der Fall.

Ich komme auf diese Punkte in Kapitel 3.5 zurück.

Verschiedene ‚technische‘ Maßnahmen bei der Datenakquisition, die möglicherweise sehr hilfreich bei den späteren Bewertungen gewesen wären erfolgten nicht. Dazu gehört die Beobachtung einer ‚modernen‘ Linie längs einer ‚alten‘ für den direkten Qualitätsvergleich aber auch

„check-shots“ aus Bohrungen in die 2011/2012 Messungen, die für das Geschwindigkeitsmodell wichtig gewesen wären. Die Einrichtung des «Fachgremium Erdwissenschaftliche Untersuchungen» für Etappe 3, in dem technische Fragen vor und während der Erkundungsarbeiten der Nagra diskutiert werden können, ist daher zu begrüßen.

3.3 Belastbarkeit der 2D-Seismik für Einengungsentscheidungen

Die Frage der Belastbarkeit der Seismik hat zwei Aspekte: Erstens stellt sich die Frage nach der erreichten Qualität der seismischen Linien und deren Interpretation, sowie der Vergleichbarkeit derselben an Standorten, unabhängig von den damit verfolgten Zielen. Zweitens muss überprüft werden, ob auch bei bester Qualität und weitgehender Vergleichbarkeit, die Ziele erreicht werden, für die die 2D-Seismik im Einengungsvorschlag in Etappe 2 benutzt wird.

Die Reflexionsseismik dient folgenden Zielen: (1) Festlegung der regionalen Störungen; (2) Identifizierung zu meidender tektonischer Zonen; (3) Bestimmung der Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine; (4) Identifikation lokaler Störungen. Die Punkte (1) bis (3) ergeben die geometrischen Grundlagen für die Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter der SMA- und HAA-Lager und für die Bewertung, ob ein ausreichendes Platzangebot im jeweiligen Wirtgestein vorhanden ist. Punkt (4) soll bei der Bestimmung von anordnungs- und einlagerungsbestimmenden Elementen helfen, die wesentlich für die Festlegung des Platzbedarfs (NAB 14-99) sind. Zu Punkt (3) ist anzumerken, dass zwar Mächtigkeitskarten aus der Seismik erstellt werden, die entscheiderelevanten Mächtigkeiten aber aus Bohrungen bestimmt werden.

Mit der verdichteten Seismik (der reprozessierten und der neuen 2011/2012 Seismik) liegt ein Profilnetz vor, mit typischen Abständen im Bereich von 1 bis 2 km, das es erlaubt, das **Ziel 1**, die Festlegung der regionalen Störungen, zuverlässig zu adressieren. Das Netz spannt sich recht gleichförmig über alle Nordschweizer Standorte sodass man von einer weitgehenden Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb dieser Standorte ausgehen kann. Der Linienabstand ist, gemessen an der Dimension der Tiefenlagers (SMA und HAA), die im Bereich von 2 km x 2 km liegt nicht sehr dicht. Das gilt für alle Standorte. Zum Beispiel führt das im Standort NL dazu, dass ein Bereich größer als 2 km x 2 km von keinem Profil überstrichen wird, genau in dem Bereich, der von der Tiefe des T_{Li} her für ein Lager in Frage käme. Hinzu kommt dass die Profile 90-SE-01 und 90-SE-02, die im Standort Nördlich Lägern (NL) liegen, nach Nagra (2012a) reprozessiert wurden und auch in der Tabelle 1b des NAB 13-10 aufgeführt werden, nicht unter den in Zeit gezeigten und interpretierten Linien im Anhang A des NAB 13-10 befindet und daher auch nicht in diesen Bericht eingegangen sind.

Ziel 2 (Festlegung der zu meidenden tektonischen Zonen) spielt eine erhebliche Rolle bei der Festlegung der optimierten Lagerperimeter. Diese Zonen sind durch post-paläozoisch reaktivierte Grundgebirgsstörungen mit Bezug zu Permokarbondtrogrändern und Antiklinal-Strukturen im Nahfeld des Überschiebungsgürtels des Faltenjura charakterisiert (NTB 14-02 Dossier II, S. 72ff).

Diese Definition führt nicht notwendig zu einer auf den Kilometer scharfen Abgrenzung, weil die Trogränder nicht eindeutig interpretierbar sind. Gleiches gilt für die Abgrenzung der Antiklinal-Strukturen. Allerdings sind die von der Nagra gezeigten Interpretationen nachvollziehbar und ein eigener Interpretationsversuch für NL kommt zu fast dem gleichen Ergebnis wie dem der Nagra. Wenn man Unsicherheiten bei der Festlegung der zu meidenden tektonischen Zonen berücksichtigen wollte, würde man sich diese zum Beispiel in NL eher weiter nach Süden erstrecken lassen.

Das Ziel (2) wird also im Wesentlichen erreicht, allerdings sollte man berücksichtigen, dass wegen der relativ großen Profilabstände, nicht die Genauigkeit erreicht wird, wie sie in den Abbildungen des Anhangs B von NTB 14-01 als gegeben erscheint.

Zur Festlegung der Tiefe des Wirtgesteins (**Ziel 3**) wird hinsichtlich des Opalinustons dessen Basis (TLi) mit der 2D-Seismik kartiert, während die Mächtigkeit aus Bohrungen bestimmt wird. Das von der Nagra benutzte Verfahren zur Gewinnung der Tiefenlage des TLi aus dem Geschwindigkeitsmodell ist aber fragwürdig und führt zu sehr großen Unsicherheiten (bis zu 100 m) in der Bestimmung der Tiefenlage. Damit ist man dem Ziel sicherlich nähergekommen als es die bloße Interpolation der Bohrlochbefunde erbracht hätte.

Die von der Nagra benutzte Methodik der Entwicklung eines Geschwindigkeitsmodells zielt vorrangig auf die Interpretation ab. Insbesondere werden mit dem sogenannten ‚Depthing-Modell‘ (NAB 13-80) Sprünge der seismischen Horizonte an Kreuzungspunkten vermieden. Die Unsicherheiten in der Tiefenlage der interpretierten Horizonte stammen einerseits von Unsicherheiten der interpretierten Laufzeitlage und Unsicherheiten bzgl. des Geschwindigkeitsmodells für die Tiefenkonversion. Letztere werden durch ad-hoc Annahmen modelliert, die aber als konservativ erscheinen, sodass zu vermuten ist, dass die tatsächlichen Unsicherheiten eher geringer ausfallen.

Andere Methoden diese Unsicherheiten zu quantifizieren oder wenigstens zu klassifizieren werden nicht benutzt. Solche wären z.B. die Analyse der Sprünge in der Tiefe von Markerhorizonten an Kreuzungslinien und geologisch/stratigraphisch begründete Annahmen statt der ad-hoc-Hypothese von 5% möglicher Geschwindigkeitsvariation. Die Nagra vergleicht die Tiefenlage TLi aus Etappe 1, die von einem Geschwindigkeitsmodell stammt, das ausschließlich auf Bohrlochbeobachtungen beruht, mit dem ‚Depthing-Modell‘ (NTB 14-02 Dossier II Fig. 5.3-3). Der Vergleich ergibt aber nicht die tatsächlichen Unsicherheiten, sondern nur den Unterschied zwischen einem schlichten und einem guten Modell.

Die Nagra argumentiert, dass eine weniger konservative Schätzung der Fehler in der Tiefenlage TLi zu keinen anderen Ergebnissen führt was das mangelnde Platzangebot für ein HAA-Lager in Nördlich Lägern und das mangelnde Platzangebot für ein SMA-Lager im Jura-Südfuss, Nördlich Lägern und Südranden betrifft. Wenn dem so ist, wäre die Genauigkeit bei der Bestimmung der Tiefenlage des TLi keine relevante Information bei der Zurückstellung von Standorten. Diese Aussage der Nagra ist aber unzutreffend. Die Szenarien für Lagerperimeter für NL zeigen, dass das Platzangebot von 4.2 km² bei Annahme der Referenztiefe des TLi (HAA-NL-mLE-r) auf 9.8 km² bei Einschluss der unteren Fehlergrenze (HAA-NL-mLE-u) steigt. Zudem hängt dieser Aspekt auch von den in Etappe 2 wesentlich veränderten maximalen Tiefen wurden für ein SMA-Lager von 800 m auf 600 m und für ein HAA-Lager von 900 m auf 700 m für HAA herabgesetzt (NTB 14-01, S. 25 und 170ff).

Die Mächtigkeit der Opalinusformation wird in den Karten des NTB 14-02 Dossier II in A1-12 (SR und ZNO), A2-9 (NL), A3-9 (JO) und A4-10 (JS) mit einer räumlichen Auflösung gezeigt, die sich aus der Dichte der seismischen Linien und der Güte des Geschwindigkeitsmodells nicht begründen lässt.

Die Unsicherheiten in der Tiefenlage des TLi werden in NAB14-34 auf zwei Ursachen zurückgeführt. Unsicherheiten in der interpretierten Laufzeitlage $\Delta t = \Delta t_{stat} + \Delta t_{interpr}$ mit $\Delta t_{stat} = \pm 8 ms$ und $\Delta t_{interpr}$ abhängig von der Zuverlässigkeit des Horizontpicks zwischen $\Delta t_{interpr} = \pm(1-3) ms$ für robuste picks, $\Delta t_{interpr} = \pm(4-10) ms$ für ungewisse picks, etc. angegeben sind. Diese Fehler in der

Laufzeit können als mit einer Normalverteilung zufallsverteilt angenommen werden. In die Tiefe

müssen sie mit den RMS-Geschwindigkeiten zum TLI umgerechnet werden: $\Delta z_T = \frac{1}{2} \cdot V_I \cdot \Delta t$. Das ist dann die Standardabweichung des Tiefenfehlers. Mit den Werten für die TLI Reflexionen in Südranden $\Delta t = 10 \text{ ms}$ und einer angenommenen Intervallgeschwindigkeit $V_I = 3.000 \text{ m/s}$ ergibt sich $\Delta z_T = 15 \text{ m}$ als Standardabweichung.

Der zweite Fehleranteil resultiert aus den Unsicherheiten der Geschwindigkeiten. Diese haben selbst wiederum zwei Komponenten: Eine Zufallskomponente, die im Wert der Abweichung des sogenannten depthing-Modells vom Startmodell besteht (NAB14-34, Abschnitt 6.1.2) und einer deterministischen Komponente, die linear mit der Entfernung von den Kalibrierungsbohrungen zunimmt. In den Karten der Nagra (NTB14-02 Dossier II) sind alle Anteile zusammen dargestellt. Will man die Bedeutung der Unsicherheit z.B. in Südranden bewerten muss man die deterministische von den zufälligen Komponenten trennen. Mit den verfügbaren Informationen kann man nur die zufälligen Laufzeitfehler von den Geschwindigkeitsfehlern trennen. Dann ergibt sich für Südranden folgendes Bild: Aus NTB 14-02 Dossier II, Anhang A1-14 ergibt sich ein totaler Tiefenfehler von $\Delta z = \Delta z_T + \Delta z_V = 15 \text{ m} + \Delta z_V$, sodass also der deterministische Anteil $\Delta z_V = 35 \text{ m}$ ist.

Angenommen ich betrachte eine typische Lagertiefe von 350 m u.T., die sich aus einer Bestimmung der Tiefe des TLI von 400 m ergibt. Die Nagra betrachtet nun 3 Möglichkeiten als gleichwertig (-r: 350 m u.T., -t: 400 m u.T., -u: 300 m u.T.). Jeder dieser Fälle kann eintreten; die Fälle -u und -t sind ebenso realistisch wie -r, das bei den Angaben zum Platzangebot immer als Referenzfall benutzt wird. Nachdem ein Teil der Fehler aber zufälliger Natur ist kann man folgende Betrachtung anstellen, die sagt, dass nur 35 m Unsicherheit deterministisch sind. Dann gibt es 3 Möglichkeiten, die als gleichwertig zu betrachten sind: -r: 350 m u.T. und zufällige Schwankungen, -t: 385 m u.T. und zufällige Schwankungen, -u: 315 m u.T. und zufällige Schwankungen. Wenn die zufälligen Variationen der Tiefe als normalverteilt mit Standardabweichung von 15 m angesehen werden findet man, dass im Modell -u: 300 m Tiefe der Lagerebene nur mit 16% unterschritten werden, und in den anderen Modellen (-r: 350 m und -t: 385 m) mit noch viel kleineren Wahrscheinlichkeiten. Umgekehrt besteht im Modell -t nur eine 16% Wahrscheinlichkeit, dass die Lagerebene tiefer als 400 m liegt und die Wahrscheinlichkeiten für die anderen Modelle (-r: 350 m und -u: 315 m) noch viel kleiner sind.

Die Aussage, dass die von der Nagra als -u und -t angegebenen Fälle eine kleinere Wahrscheinlichkeit aufweisen als der -r Fall trifft auch auf die anderen Nordschweizer Standorte zu. Die totale Unsicherheit in den in Frage kommenden Teilen der Standortgebiete wird typisch mit ca. 50 m angegeben: NTB 14-02 Dossier II: A1-14: SR: 40 bis 60 m; A1-14: Z-NO: 20 bis 40 m um Benken; 40 bis 60 m im nördlichen Teil; A2-11: NL: 20 bis 40 m um Weiach; 40 bis 80 m weiter nach Süden; A3-10: JO: 20 bis 40 m um Rinicken; 40 bis 60 m sonst; A4-12: JS: 60 bis 80 m.

In den Szenarien zur Ermittlung des Platzangebots in NTB 14-01 und in NAB 16-41 ändert sich dieses zum Teil recht signifikant je nachdem welche Option (-r, -u, -t) benutzt wird. Zum Beispiel liefert die -t Option für ein SMA Südranden ein hinreichendes Platzangebot, im Unterschied zum Referenzszenario. Für SMA Jura Südfuß reicht das Platzangebot mit der -t Option nicht aus. Für HAA Zürich-Nordost führt die -u Option zu geringen Platzangebot, das erst wieder ausreicht wenn die maximale Tiefe des Top Opalinus etwas flacher als die geforderten 450 m akzeptiert wird.

Ziel 4 (Identifikation lokaler Störungen): Lokale Störungen sind Versätze in Reflektoren, die größer als etwa 25 m sind (NAB 13-10), nur auf einer Linie zu sehen sind bzw. nicht auf benachbarten Linien korrelierbar sind. Daher weiß man auch nicht, wie diese Brüche streichen und welche laterale Ausdehnung sie haben. Insbesondere weiß man nicht wie häufig sie innerhalb der Fläche eines Lagers vorkommen und wie häufig ihnen beim Bau des Lagers auszuweichen ist. Bei der Festlegung des Platzbedarfs (NAB 14-99) spielen diese unbekanntes lokalen Störungen die entscheidende Rolle hinsichtlich des unterschiedlichen Platzbedarfs der Standorte (SMA: SR 3 - 4 km², ZNO 3 km², NL 4 - 5 km², JO 3 – 4 km², JSF 6 – 8 km²; HAA: ZNO 6 km², NL 8 - 12 km², JO 6 – 9 km²), allerdings nur in einem statistischem Sinn, bei dem aber auch noch zwischen Störungsdichte in Fall- und Streichrichtung des Wirtgesteins unterschieden wird, weil die Lagerkammern im Fallen ausgerichtet werden. Eine Abschätzung der Störungsdichte in Fall- und Streichrichtung kann auf der Basis einer 3D-Seismik erfolgen, die nicht nur die Orientierung der Störungen sichtbar macht sondern auch, wegen ihrer höheren Auflösung (ca. 5 m statt 20 m bei 2D-Seismik), die Störungen besser erkennen lässt. In NTB 14-02 Dossier II (S. 82) wird erläutert, dass die in NAB 14-99 benutzten Störungsdichten nur ‚mögliche‘ Dichten sind, die sich aus den Ergebnissen der Seismik-Interpretation, der geologischen Feldaufnahmen und geostatistischen Simulationen von Störungsnetzwerken ergeben. Hier ist festzuhalten, dass die 2D-Seismik keine belastbaren Aussagen zu Störungsdichten erlaubt, während eine 3D-Seismik dies sehr wohl erlauben würde. Die seismische Interpretation erlaubt zwar eine Klassifizierung, die in NAB 14-99 ‚Grobcharakterisierung‘ genannt wird, in Standorten mit größerer und geringerer Tektonisierung (NAB 14-99, Tab. 3.1-1 und 3.1-2), aber keine Quantifizierung, wie sie dort im Weiteren vorgenommen wird. Die vorgeschlagene Quantifizierung ist daher nicht belastbar.

3.4 Zu den Nordschweizer Standorten im Einzelnen

Südranden: Das Mesozoikum ist kaum tektonisiert, allerdings erscheint der TLI-Reflektor/Horizont unterschiedlich gut im Standortgebiet. Zu meidende tektonische Zonen sind nicht erkennbar. Das Platzangebot wird gut, wenn die untere Tieflage, die das Geschwindigkeitsmodell zulässt angenommen wird (SMA-SR-aL5-t, NTB 14-01, B14) und zwar unter Vermeidung der Neuhauserwald-Rinne. Das Platzangebot ist dann in einem Gebiet verfügbar in dem die Mächtigkeit des Opalinus über 100 m liegt (NTB 14-02 Dossier II, Beilage A1-12). Jedenfalls sind die Abb. B.1-3 bis B.1-9 in NTB 14-01 nachvollziehbar.

Zürich Nordost: Durch die Verfügbarkeit der 3D-Seismik sind die Aussagen der Abb. B.2-3 bis B.2-7 (SMA) und der Abb. B.7-3 bis B.7-8 (HAA) in NTB 14-01 nachvollziehbar.

Nördlich Lägern: Hier spielt die zu meidende tektonische Zone im Norden eine wesentliche Rolle bei der Einengung. Die Abb. B.3-3 in NTB 14-01 zeigt eine Detailliertheit der zu Südgrenze der zu meidenden tektonischen Zone auf einer Skala unterhalb 1 km, die eher ein Ergebnis einer räumlichen Interpolationssoftware sind als ‚echt‘ wenn man den Linienabstand bedenkt. Ähnliche gilt in dieser Abbildung für den Lagerperimeter (mLE-r) der aus zwei ‚Flecken‘ von ca. 500 m Durchmesser besteht, also einer Größenordnung, die wiederum nur aus der Interpolation stammen kann und nicht durch die Beobachtung begründet ist. Die Lage der verfügbaren seismischen Linien erlaubt es nicht, den Bereich zu bewerten, in dem das Platzangebot gesucht wird. Damit sind die Aussagen der Abb. B.3-3 bis B.3-6 (SMA) und der Abb. B.8-3 bis B.8-10 (HAA) in NTB 14-01 möglich und insofern nachvollziehbar aber nur beschränkt belastbar.

Jura Ost: Hier spielen die zu meidenden tektonischen Zonen keine große Rolle, weil nur ein kleines Gebiet im Südosten damit ausgegrenzt wird. Die Tektonisierung scheint im gesamten Gebiet

eher schwach ausgeprägt. Die Mächtigkeit des Opalinustons scheint außerhalb der zu meidenden Zonen über 120 m zu liegen. Die Ungewissheiten in der Tiefenlage T_{Li} liegen mit typisch +/- 50 m im unteren Bereich im Vergleich mit den anderen Standorten. Damit sind die Aussagen der Abb. B.4-3 bis B.4-8 (SMA) und der Abb. B.9-3 bis B.9-11 (HAA) in NTB 14-01 nachvollziehbar.

Jura-Südfuss: Hier spielen die zu meidenden tektonischen Zonen keine große Rolle, weil damit im Wesentlichen nur ein kleines Gebiet innerhalb regionaler Störungen im Südosten ausgegrenzt wird. Diese ausgewiesene zu meidende tektonische Zone ist nachvollziehbar. Insgesamt zeigt sich eine deutlich stärkere Tektonisierung am T_{Li} und den darüber und darunter liegenden Horizonten, sowohl auf den N-S- als auch den O-W-Linien. Die Aussagen der Abb. B.5-3 bis B.5-9 in NTB 14-01 zum Lagerperimeter sind nachvollziehbar.

3.5 Die spezifischen Fragen des ENSI

Die Fragen des ENSI (Kapitel 1.3) beantworte ich wie folgt:

Frage 1: Entsprechen die durchgeführten Arbeiten und die angewandten Techniken dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik bzw. sind diese stufengerecht?

Für die 2D-Seismik ist diese Frage – mit den oben diskutierten Einschränkungen - positiv zu beantworten. Mit dem Vorliegen des NTB 14-01 wurde klar, dass es bei der Zurückstellung von Standorten, insbesondere von NL, letztlich um wenige km² hinsichtlich der verfügbaren im Vergleich mit der benötigten Fläche geht.

Damit sind Linienabstände von 1 oder 2 km nicht mehr adäquat und eine 3D-Seismik in den Standortgebieten wäre zu bevorzugen gewesen. Die Frage nach der Stufengerechtigkeit ist aber nicht identisch mit der Frage, ob alle Schlussfolgerungen der Nagra aus der 2D-Seismik nachvollziehbar sind. Vielmehr steht im Vordergrund, ob die 2D-Seismik eine Grundlage zu Einengungsentscheidungen darstellt. Wenn man dabei alle Nordschweizer Standortgebiete und die Ziele (1), (2) und (3) betrachtet kann man die Stufengerechtigkeit attestieren. Der problematischere Fall von Nördlich Lägern ist dabei die Ausnahme weil hier das Zusammenspiel der großen Tiefenlage des Opalinustons, seines Einfallens nach Süden und die Nähe des weniger tiefen Teils zur zu meidenden tektonischen Zone eine höhere räumliche Auflösung als die 2D-Seismik liefert wünschenswert macht.

Frage 2: Erfolgte die Erarbeitung der Unterlagen mit der notwendigen Sorgfalt und Qualitätssicherung?

Ein klares Ja!

Frage 3: Sind die Ungewissheiten und Unsicherheiten ausreichend spezifiziert?

Beim Prozessing werden viele Optionen bzgl. der Wahl der Prozessingparameter getestet. Die Nagra hat diese verschiedenen Optionen und deren Wirkung auf die zu interpretierenden Linien teils in den Berichten dargestellt. Darüber hinaus wurde den Reviewern eine Reihe von Abbildungen, die die Berichte nicht enthalten können, zur Verfügung gestellt und mit Computerdemonstrationen bei DMT Petrologic GmbH einzelne Prozessingschritte nachvollziehbar demonstriert. Die Nagra hat sich damit die größte Mühe gegeben, den ‚Raum‘ möglicher Parameter auszuloten. Es zeigen sich dabei deutliche Unterschiede dort, wo steilstehende Störungen vorhanden sind, die auch zu verschiedenen Interpretationen der mesozoischen Tektonik führen können. Wie schon

weiter vorne angemerkt sind die mesozoischen Schichten mit geringen Neigungen aber sehr robust gegen die Wahl der Prozessingparameter.

Das Geschwindigkeitsmodell wird mit detaillierter (wenn auch nach meiner Meinung fragwürdiger) Fehleranalyse versehen, die dann für verschiedene Szenarien der Tiefenlage des TLI benutzt wird. Dies gilt für die gesamte Nordschweiz.

Die Festlegung der zu meidenden tektonischen Zonen beinhaltet interpretative Unsicherheiten. Es wurde nicht versucht, diese zu quantifizieren. Allerdings spielen die zu meidenden tektonischen Zonen vor allem in NL (im Norden) eine Rolle und sind so wie sie von der Nagra festgelegt wurden nachvollziehbar. Sie würden bei einer konservativeren Interpretation eher weiter nach Süden zu legen sein.

Der TLI, als Reflektor, ist in den einzelnen Standorten recht verschieden ausgeprägt. Das findet keine Berücksichtigung. In den Karten der Tiefenlage des TLI, die zur Optimierung der Lagerperimeter benutzt werden (NTB 14-01 Fig. 4.2-11 bis 4.2-23; NTB 14-01 Anhang Fig. B1.1 bis B.5.-9) erscheint der TLI immer als gleich guter Reflexionshorizont, was er aber nicht ist. Die Vergleichbarkeit der Daten in den Standortgebieten wird ebenfalls einfach unterstellt. Der TLI zeigt z.B. in NL erhebliche Lücken in der Überdeckung mit Linien genau im relevanten Gebiet, wo die Platzierung eines Lagerperimeters möglich wäre. Die entsprechenden Abbildungen suggerieren aber immer gleiche Qualität der Reflektorlage und –qualität.

Frage 4.5: Sind die Überprüfung des Schichtmodells durch die Nagra auf Konsistenz bzw. Abweichungen mit den Seismikdaten in Tiefe und die daraus resultierende Entscheide zur Anpassung des Schichtmodells nachvollziehbar?

Wie oben diskutiert, sind die Ungenauigkeit des Geschwindigkeitsmodells bzw. die damit verbundenen Ungenauigkeiten der Tiefenlage bei der von der Nagra benutzten Methode sehr groß. Diese Unsicherheiten sind nicht im Hinblick auf geologisch/stratigraphische Konsequenzen untersucht worden.

Frage 5.3: Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen, von anordnungsbestimmenden Störungen und von konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen nachvollziehbar?

Die regionalen Störungszonen ja.

Die zu meidenden tektonischen Zonen auf der Skala von 5 km auch, aber nicht auf Skala eines Kilometers für die sie dargestellt und benutzt werden.

Die anordnungsbestimmenden Störungen, die in der 2D-Seismik identifiziert wurden sind alle nachvollziehbar. Allerdings sind sie mit 2D-Seismik nicht vollständig ermittelbar.

Frage 5.4: Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien vollständig?

Die Interpretation ist vollständig, nutzt alle verfügbaren Daten inklusive Bohrbefunde und Ergebnisse der Gravimetrie und erfolgt nach dem Stand der Wissenschaft und Technik. Die Ergebniskarten zeigen aber teilweise eine räumliche Auflösung, die eher von Interpolationsprogrammen als von der Akquisitionsdichte der 2D-Seismik herrührt. Im Fall Nördlich Lägern führt das dazu, dass zwar eine nachvollziehbare aber nicht belastbare Interpretation vorliegt.

Frage 5.5: Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Es wurden viele verschiedene ‚Images‘, die durch verschiedene Prozessing-Möglichkeiten entstehen, in kritischen Bereichen der Profile, also z.B. an den regionalen Störungen, getestet. Das erscheint mir aber nicht sehr wichtig, weil die Teile der Standorte, die als Lagerperimeter in Frage kommen, söhlig und nur leicht geneigt sind. Da ist die Seismik sehr robust.

Zusätzliche Fragen des ENSI vom 14.7.2015

Frage 6: Zu meidenden tektonischen Zonen im nördlichen Bereich des im Standortgebietes Nördlich Lägern

In der 3D-Seismik des Zürcher Weinlandes erkennt man die Störung des Mesozoikums längs vermutlich reaktivierter Verwerfungen in Bezug zum Permokarbon-Trog sehr gut in den Beilagen 4.1 bis 4.3 von NTB 00-03. In Beilage 4.1 ist auch der Tiefenverlauf recht gut ausmachbar. Bemerkenswerterweise bleibt in dieser Interpretation aber der TLI ungestört.

Die Interpretation der Linie 11-NS-20 ist in Hinblick auf das Sub-Mesozoikum nicht eindeutig aber in Hinblick auf die Tatsache, dass sie mit der Gravimetrie kompatibel ist gut nachvollziehbar. Entscheidend ist aber, ob das Mesozoikum und der TLI gestört sind oder nicht. Die diesbezüglich in NTB 14-02 Dossier II, Fig. 4.4-5, gezeigte Interpretation ist zwar möglich – und ich habe in meiner eigenen Interpretation mit den Profilen in Zeit, die zu meidende tektonische Zone etwa gleich gelegt – aber nicht zwingend. Man sieht eigentlich keinen Versatz des Mesozoikums und auch keinen in den darüber liegenden Schichten. Allerdings wird die Reflektorqualität des TLI deutlich schlechter.

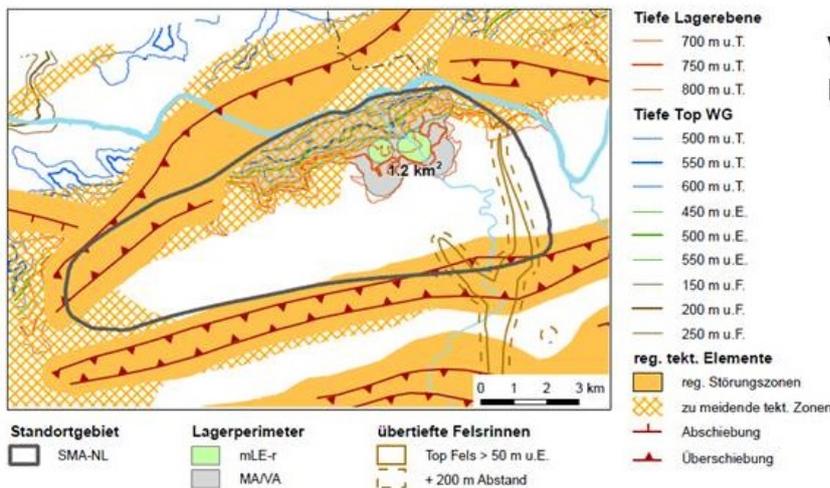
Die Antiklinale im Norden des Standortgebietes NL kann man im Profil 11-NS-20 aber auch im Profil 91-NO-58 (NTB 14-02 Dossier II, Anlage 4-3) sehen. Deutliche Störungen im gesamten mesozoischen Strukturaufbau findet man auch in dem eher in Streichrichtung der Antiklinale verlaufenden Profil 82-NS-70 östlich der Bohrung Weiach. Es könnte sich hier auch um 3D-Effekte handeln, die von der Seite einstreuen.

Bzgl. der Hypothese einer Flexur im Süden des Standortgebietes erscheint diese plausibel mit Blick auf die von der Nagra in NAB 13-10, Beilagen 7.2-2 bis 7.2-5, gezeigten Isohypsen der Basis Malm, Top Muschelkalk und Top Lias, weniger in der Basis Mesozoikum. Man muss aber zum Einen festhalten, dass es sich um Zweiweglaufzeiten handelt und nicht um Tiefen und zum Zweiten die laterale Auflösung, die diese Karten vorspiegeln nicht vorhanden ist. Gleiches gilt für die neuen Darstellungen (NAB 17-01, Frage 28: Abb.1 und Frage 28: Abb.2). Die für die 3D-Seismik in ZNO erreichbare Genauigkeit und Auflösung wird auf die nur mit 2D-Seismik überdeckten Gebiete Südranden und Nördlich Lägern übertragen. Es handelt sich also im Fall von Nördlich Lägern um ein Model der Neigung mit spärlicher Datengrundlage, während Zürich Nordost datenbasiert ist. Entsprechend sind die Aussagen zu werten.

Man muss an dieser Stelle noch einmal festhalten, dass das Ziel der Festlegung der zu meidenden tektonischen Zonen mit der verfügbaren 2D-Seismik nur eingeschränkt erreichbar ist wenn man eine Genauigkeit im Kilometerbereich benötigt.



Ausgrenzung durch regionale Störungen und zu meidende tektonische Zonen (F. Wenzel): Gezeigt sind die Ausgrenzungen auf den Profilen (blau) und eine mögliche Interpolation



Vergleich mit NTB 14-01 B25

Fig. B.3-3: Lagerperimeter Nördlich Lägeren: Fall SMA-NL-mLE-r (massgebender Lagerperimeter für die Einengung, mLE).

Frage 7: „Differenzierung bzgl. tektonischer Zergliederung bei der Abschätzung des Platzbedarfs“

Für die Abschätzung des Platzbedarfs für SMA und HAA unter Berücksichtigung von lokalen anordnungsbestimmenden Störungen, mit denen zu rechnen ist, benutzt die die Nagra in NAB 14-99 die statistischen Parameter (Gruppe B) Frequenz Störungszonen in Fallrichtung, Frequenz Störungszonen in Streichrichtung, Ausdehnung Störungszonen. Eine Störungszone bezieht sich dabei immer auf den versetzten Reflektor/Horizontal TLi.

Diese Parameter werden für die verschiedenen Standorte in NAB 14-88 abgeleitet. Es werden zwei Typen von lokalen Störungen unterschieden: Solche, die nur auf einer seismischen Linie zu sehen sind und solche, die auf zwei Linien zu sehen sind, aber nicht zu den regionalen Störungen gehören. Als Region, in denen die lokalen Störungen gezählt werden, wird die Standortregion oder ein Polygon, das das Standortgebiet einschließt, benutzt. Das führt dann zu dem ‚Mean LDF Spacing von Tab. 7-8 in NAB 14-88, wo Nördlich Lägeren und Jura-Südfuss ein – im Vergleich zu den anderen Standorten - erheblich kleineres ‚Spacing‘ zeigen. LDF bedeutet dabei Layout-Determining Faults = anordnungsbestimmende Störungen.

Die Streichrichtung der Störungen, die nur auf einer Linie zu sehen sind, wird aus der Beobachtung des Streichens von Rissen in geologischen Aufschlüssen in der Nordschweiz aus vorwiegend jurassischen Gesteinen (NAB 12-41) hergeleitet. Über die Länge der Brüche glaubt man aus der 3D-Seismic Hinweise zu haben (140 bis 600 m).

Das angewandte Verfahren ist sehr fragwürdig. Zunächst ist es nicht möglich, mit der verfügbaren 2D-Seismik die Zahl der gesuchten lokalen Störungen, auch in einem statistischen Sinn, zu bestimmen. Hier ist die 2D-Seismik eindeutig überfordert. Die Feststellung eines Unterschieds zwischen ZNO, wo eine 3D-Seismik vorliegt, und z.B. NL kann nur erfolgen, wenn in beiden Standorten eine 3D-Seismik vorliegt. Ein Vergleich der Zahl von abgezählten lokalen Störungen aus 2D-Seismik mit 3D-Seismik ist nicht aussagekräftig.

Hinzu kommt, dass, um eine halbwegs große Zahl an Störungen zu erhalten, nicht der Lagerperimeter genommen wird, den sie mittels zu meidender tektonischer Zonen und Tiefenlagen einschränken, sondern das Standortgebiet selbst bzw. ein dieses einschließendes Polygon. Damit werden aber auch Störungen gezählt, die mit den regionalen Störungen und den zu meidenden tektonischen Zonen assoziiert sind.

Angesichts dieser systematischen Fehler in der Ableitung der Parameter muss man davon ausgehen, dass deren Quantifizierung nicht gelungen ist und keine wissenschaftlich haltbare Grundlage für die Abschätzung des Platzbedarfs darstellt, wie er in NAB 14-99 erfolgt.

3.6 Referenzen

- NTB 00-03: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.
- NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-02 Dossier II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NAB 12-41: Characterisation of Cenozoic brittle deformation of potential geological siting regions for radioactive waste repositories in Northern Switzerland based on structural geological analysis of field outcrops, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.
- NAB 13-09: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seimik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-11: 2D-Seismik Wellenberg Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-80: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

- NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-99: Unterlagen zum Platzbedarf in den Lagerperimetern der geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 16-41: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation (Hauptbericht), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 17-01: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2017.
- Nagra (2012a): „Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Nagra (2012b): 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.

4 Expertenbericht Prof. Dr. A-G. Milnes

**Review der Ergebnisse der Nagra 2D-Seismik
in der Nordschweiz hinsichtlich ihrer
geologisch-tektonischen Interpretation**

Expertenbericht zuhanden des
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in Brugg.

Prof. Dr. Alan Geoffrey Milnes

Expertengruppe Geologische Tiefenlage (EGT)

Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

4	Expertenbericht Prof. Dr. A-G. Milnes	70
4.1	Einführung	72
4.2	Beurteilungsunterlagen	72
4.3	Die interpretierten Referenzprofile	73
4.3.1	Referenzprofile in Zeit (NAB 13-10, Beilage 5 und Anhang A)	74
4.3.2	Tiefenkonvertierte Referenzprofile (NAB 14-34, Anhang 2)	74
4.3.3	Bewertung	76
4.4	2D-Seismik als Basis für die Festlegung der Lagerperimeter	76
4.4.1	Vermeidungsstrategie der Nagra ("avoidance strategy")	77
4.4.2	Eignungsstrategie ("suitability strategy") als Alternative	79
4.4.3	Bewertung	82
4.5	2D-Seismik als Basis für statistische oder quantitative Analysen	83
4.5.1	Bewertung	84
4.6	Detailanalyse der seismische Daten in stratigraphisch-sedimentologischer Hinsicht	84
4.6.1	Effinger-Schichten	84
4.6.2	'Brauner Dogger'	84
4.6.3	Bewertung	85
4.7	Beantwortung der ENSI-Leitfragen und -Ergänzungsfragen zu den Ergebnissen der 2D-Seismik Kampagne	85
4.8	Referenzen	88
	Anhang	90

4.1 Einführung

Im Rahmen der Etappe 2 des "Sachplans geologisches Tiefenlager" (SGT) müssen die Kenntnisse über die Standortgebiete die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse und eines sicherheitstechnischen Vergleichs erlauben. Dazu ließ die Nagra ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchführen. Ein wichtiger Bestandteil dieses Untersuchungsprogrammes bildete die Reprozessierung der 2D-Seismikdaten von älteren reflexionsseismischen Kampagnen (aus den Jahren 1981-1992) und die Aquisition und Prozessierung im Rahmen einer neuen 2D-Seismik Kampagne (aus den Jahren 2011-2012). Die ersten Resultate diese Untersuchungen sind in einem umfangreichen Bericht (NAB 13-10) und in den dazugehörigen Hintergrundsberichten präsentiert. Daraufhin hat das ENSI eine externe Expertengruppe zur Beurteilung der eingereichten Arbeiten bezüglich 2D-Seismik eingesetzt. Innerhalb die Expertengruppe 2D-Seismik erhielt der Autor des vorliegenden Berichts als Mitglied der Expertengruppe Geologische Tiefenlager (EGT) und als Geologe mit Erfahrung in der geologisch/tektonischen Interpretation seismischer Daten den Auftrag, die Interpretation der geologisch-tektonischen Aspekte zu beurteilen.

Die Review-Arbeit sollte in zwei Schritte erfolgen. In einem ersten Schritt wird die Zeit-Interpretation der seismischen Profile im Bericht NAB 13-10 provisorisch beurteilt. Eine Zusammenfassung der Beurteilungsergebnisse wurde somit nach Diskussionen in den vorangehenden Sitzungen der Expertengruppe 2D-Seismik in einem ersten Bericht in Mai 2014 präsentiert (Milnes: Zwischenbericht 2D-Seismik, 22. Mai 2014). Eine definitive Beurteilung der endgültigen Unterlagen der seismischen Interpretation der Nagra, besonders der tiefenkonvertierten Profile, sollte in einem zweiten Schritt erfolgen. Diese Unterlagen konnten Ende 2014 von der Expertengruppe eingesehen werden, und waren schlussendlich, zusammen mit der von der Nagra durchgeführten Standort-Auswahl, Ende Januar 2015 publiziert. Seitdem läuft Schritt 2 des Beurteilungsprojekts des ENSI. Hauptfokus in diesem Schritt war die Tiefenkonvertierung und Interpretation der Zeit-Interpretation in NAB 13-10 sowie die reflexionsseismische Analyse des "Braunen Doggers" und der Effinger Schichten. Die seismischen Daten zur Beurteilung in Schritt 2 waren in diversen Dokumenten verstreut (siehe unten sowie Kapitel 1.4), was einen Review innerhalb einer kurzen Frist signifikant erschwert. Es hat sich auch herausgestellt, dass der Nagra-Bericht NAB 13-10 nochmals in die Review-Arbeit eingezogen werden musste, um den Review der späteren Dokumente sinnvoll zu machen.

4.2 Beurteilungsunterlagen

Der Schlüsselbericht NAB 13-10 stellt eine umfangreiche Dokumentation der von der Nagra ausgeführten reflexionsseismischen Untersuchungen in der Nordschweiz dar. Darin werden die neueren Profile (aufgenommen in Jahren 2011/2012) als interpretierte und nicht-interpretierte Profile in Zeit (CRS-Migration) präsentiert. Die älteren Profile (aufgenommen in Jahren 1982 bis 1984 und 1991 bis 1992) wurden reprozessiert und reinterpretiert, um einen möglichst genauen Vergleich zwischen den älteren und den neuen Daten zu erreichen, und sind als interpretierte und nicht-interpretierte Profile in Zeit im gleichem Maßstab in einem Anhang beigelegt. Einige ältere SEAG-Linien lagen auch vor, reprozessiert auf die gleiche Weise, und konnten bei der Nagra eingesehen werden.

Im Unterschied zu den in Schritt 1 des Reviews begutachteten Nagra-Unterlagen (NAB 13-10) ist die nachfolgende Dokumentation weniger fokussiert, und die geologisch-tektonischen Interpretationen werden auf verschiedenen Berichten verteilt. Hauptbericht in Bezug auf Datenverarbeitung

(Konvertierung in Tiefenprofile) ist NAB 14-34. Dieser übernimmt die geologisch-tektonische Interpretationen des NAB 13-10 vollumfänglich, außer einiger Details, die genau beschrieben sind. In Bezug auf die Interpretationen von geologischen und tektonischen Verhältnissen, die die Arbeiten in NAB 13-10 weiterführen und abschließen, ist die Dokumentation in verschiedenen Berichten verteilt und nicht gut organisiert. In dieser Hinsicht ist die wichtigste Quelle der Bericht NTB 14-02 Dossier II, aber einige andere Berichte enthalten ebenfalls wichtige Grundlagen, wie unten angegeben:

Bearbeitung und Analyse der prozessierten und reprozessierten reflexionsseismischen Daten; Erarbeitung der Referenzprofile mit Basisinterpretation

NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

Projektorientierte geologisch-tektonische Interpretation der Referenzprofile

NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02 Dossier II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-17: Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbondrogs: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-57: Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-58: Reflexionsseismische Analyse der 'Braunen Doggers', Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

4.3 Die interpretierten Referenzprofile

Die Endprodukte der Prozessierung/Reprozessierung in Zeit (NAB 13-10) und der Tiefenkonvertierung (NAB 14-34) sind Referenzprofile, die als Ausgangspunkte für die geologisch-tektonische Interpretation dienen. Die erhalten erste Interpretationen der Geologie und Tektonik ("Basisinterpretationen"), die ein Skelett von gesicherten Daten (gute Reflektoren, eindeutige Verstellungen, klare Identifikation von Artefakten, usw.) darstellen, Daten und Interpretationen die schon von Anfang an als robust zu betrachten sind. Die von der Nagra publizierten Referenzprofile werden

in der Folge kurz aus Sicht eines Geologen betrachtet, und einige Schwachpunkte erläutert. Diese sind nicht an sich kritisch für eine Beurteilung des ganzen Projekts aber sollten im Auge gehalten werden, wenn es um die Qualitätssicherung, die Unsicherheiten und die Anwendung der Referenzprofile bei der weiteren projektorientierte Bearbeitung angeht.

4.3.1 Referenzprofile in Zeit (NAB 13-10, Beilage 5 und Anhang A)

Aus den Ausführungen der Prozessierungs-Experten in der 2D-Seismik- Reviewgruppe (siehe Beiträge zur Datenverarbeitung in diesem Bericht und die Protokolle zu den Diskussionssitzungen mit der Nagra) wurde klar, dass sich die Experten einig sind: Die Prozessierung bzw. Reprozessierung der seismischen Daten in Zeit (wie in NAB 13-10 präsentiert: Mit vertikaler Achse in Millisekunden Two-Way-Time (TWT) und Reflektoren mit Qualitätsbezeichnungen dargestellt) wurde in Hinblick auf die Projektziele (Eingrenzung von Standortgebieten, Identifizierung von regionalen Störungszonen, usw.) optimal durchgeführt. Die Anwendung der CRS-Migration hat gewisse Fragen aufgeworfen, ist aber von den Experten zur Erreichung der Projektziele gutgeheißen worden. Die 2D-seismische Datenverarbeitung wird als "state-of-the-art" beurteilt. Es bleibt aber eine Anzahl von systembedingten Problemen, die für 2D-Seismik typisch sind und nicht durch die Anwendung von anderen Verarbeitungsmethoden aus dem Weg geräumt werden können (z.B. große Abstände der Linien, niedrige Resolution von Verwerfungen, "misfit"-Verarbeitung, usw.).

Wünschenswert wäre meines Erachtens (als Nicht-Expert in Sachen seismischer Datenverarbeitung) gewesen, dass bei der Planung der 2011/2012-Kampagne mehr Gewicht auf "empirische" Datenaquisition gelegt worden wäre, z.B. auf Vergleichsmöglichkeiten von "älteren" und "neueren" Profilen entlang derselben Linie, z.B. durch die Führung von einigen "neueren" Linien über existierende Tiefbohrungen, usw.. Im Falle der Standortgebiete Jura Ost und Nördlich Lägern, zum Beispiel, wäre es wünschenswert gewesen, in der 2011/2012 Kampagne, Linien über die Tiefbohrungen Riniken und Weiach zu legen, um eine Neubearbeitung der "well-to-seismic"- Daten zu ermöglichen (besonders auch deshalb weil keine N-S oder NW-SE verlaufende "Querlinie" - über die Weiach-Bohrung bereits existiert). Ich vermisse auch einen spezifischen Vergleich zwischen den 2D-Linien verschiedenen Alters und der 3D-Seismik im Standortgebiet Benken - als Interpretationshilfe.

In Allgemeinen ist aber die Dokumentation der Referenzprofile in NAB 13-10 sehr gut und zweckdienlich, insbesondere die parallele Präsentation der nicht-interpretierten und basis-interpretierten seismischen Profile, die Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren und tektonischen Strukturen, die systematische Beschreibung und primäre Interpretation der individuellen Profile und die Charakterisierung der regionalen Störungszonen. NAB 13-10 stellt eine solide Grundlage für die weiteren Interpretationsschritte und für die Anwendung der 2D-Seismik als Erkundungswerkzeug für die Planung von Etappe 3 des SGT-Projekts dar.

4.3.2 Tiefenkonvertierte Referenzprofile (NAB 14-34, Anhang 2)

Die Tiefenkonvertierung der seismischen Daten, mit Ausgangspunkt in der Datenverarbeitung in Zeit (NAB 13-10), ist nach der Beurteilung der Prozessierungsexperten in der Seismik-Gruppe auch als auf dem heutigen Stand der Forschung und Technik zu betrachten (siehe Beiträge zur Datenverarbeitung in diesem Bericht). Die komplizierte Methodik ist in Detail in NAB 14-34 beschrieben und die tiefenkonvertierten Referenzprofile sind im NAB 14-34, Anhang 2, als skalierte PSDM-Profile präsentiert. Obwohl als "state-of-the-art" vom Standpunkt der Datenverarbeitung

anerkannt, zeigen meines Erachtens nach die Interpretation und Präsentation dieser Referenzprofile einige Schwachpunkte, die die sonst sehr hohe Qualität der Arbeiten beeinträchtigen. Diese sind nachfolgend kurz erläutert.

1. Die Basisinterpretation (Störungszonen, Kartierung der Markerhorizonte, stratigraphischen Zugehörigkeit der Markerhorizonte) ist gemäss NAB 14-34 ohne wesentliche Änderungen von den Profilen in NAB 13-10 übernommen worden. Diese Aussage muss aber relativiert werden. Der markanteste Unterschied ist das Fehlen der Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren. Sie sind alle mit kontinuierlichen Linien eingezeichnet, unabhängig davon, ob sie als "gut definiert" (kontinuierliche Linie), "ausreichend definiert" (gebrochene Linie) oder "schlecht definiert / konzeptuell" (punktierte Linie) in NAB 13-10 eingezeichnet sind. Da die Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren und Strukturen ein fundamentaler Teil der Basisinterpretation ist, stellt ihr Fehlen in den tiefenkonvertierten Referenzprofilen einen signifikanten Informationsverlust dar. Die Anwendung von kontinuierlichen Linien, unabhängig von der Qualität der Reflektoren, täuscht eine Gewissheit vor, die nicht vorhanden ist. Dadurch ist es nicht mehr möglich, ausschließlich die Referenzprofile in NAB 14-34 zu betrachten, oder als definitive Endresultate der Prozessierung/Reprozessierung zu sehen. Bei der Bearbeitung muss man vielmehr unbedingt die Profile in Zeit in NAB 13-10 konsultieren.
2. Als Neuigkeit erscheint in NAB 14-34 der Hilfshorizont, "near top Opalinuston, nTop", ein "Reflektor" der in NAB 13-10 nicht auskartiert wurde. In den Referenzprofilen in NAB 14-34 ist aber dieser Hilfshorizont nirgends als gut definierter Reflektor ausgebildet. Trotzdem ist er als kontinuierliche Linie in den Referenzprofilen eingezeichnet. Erst im Verlauf von Diskussionen mit Experten der Nagra stellt sich heraus, dass die Qualität der Hilfshorizont nTop überall als "schlecht ausgebildet/konzeptuell" zu bezeichnen wäre.
3. Dem für die Basisinterpretation und die Tiefenkonvertierung kritischen Schritt der Datenbearbeitung "well-to-seismic processing" (Korrelation Bohrloch-Seismik) ist in der Dokumentation NAB 13-10 und NAB 14-34, meiner Meinung nach, zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. Es werden nur ganz knappe Erklärungen in den relevanten Beilagen geliefert. Auch ein Vergleich zwischen den korrespondierenden Beilagen in NAB 13-10 und NAB 14-34 bringt keine Klarheit. Zum Beispiel ist unklar wieso die geophysikalischen Bohrlochdaten (gemessen in bekannten Tiefen) in NAB 13-10 schon in Zeit-Einheiten angegeben werden und in NAB 14-34 wieder in Tiefe-Einheiten zurückkonvertiert werden (und ob diese Zurückkonvertierung mit den Tiefen in der ursprünglichen Bohrlogs korrespondiert oder nicht). Es ist auch nicht klar, warum die Abbildungen in der Reflexionsseismik in NAB 13-10 mit einer Breite von 31 CDP Spuren und in NAB 14-34 mit nur 11 Spuren gezeigt werden. Das erschwert auch einen Vergleich zwischen den Beilagen (vergl. z.B. die Präsentation der Daten der Bohrung Riniken in NAB 13-10, Beilage 2.7, und NAB 14-34, Beilage 2.4). Alle anderen Schritte der Prozessierung in Zeit und in Tiefe sind sehr ausführlich beschrieben, nur diese nicht, wo handfeste aber verschiedenartige Datensets zu korrelieren sind.
4. NAB 14-34 legt großes Gewicht auf der Abschätzung der Ungewissheiten von Tiefen- und Mächtigkeitsangaben anhand der interpretierten seismischen Horizonte (op. cit. Kapitel 6 und Beilage 6-1 bis 6-9). Dies ist an sich eine positive Eigenschaft des Berichts, aber auch schwierig zu verstehen. Es heißt, zum Beispiel, dass die Tiefe von Horizonten am Bohrloch mit einem Tiefen-Fehler von +/- 20-40 m angegeben sind und dass Ungewissheiten

von +/- 150 m oder mehr in Gebieten in einigen Kilometer Entfernung vom Bohrloch geschätzt werden. Diese Ungewissheiten - die geologisch schwierig nachvollziehbar sind - sind scheinbar ein Resultat der komplexen Methodik der Tiefenkonvertierung. Es stellt sich also die Frage, ob solche Ungewissheiten auch bei der Prozessierung der seismischen Profile in Zeit vorkommen - aber darüber ist in NAB 13-10 nichts zu finden. Obwohl solche quantitativ abschätzbaren, aus der Prozessierung entstandene, Ungewissheiten in NAB 14-34 ausführlich dokumentiert sind, sind sie scheinbar sehr wenig in der weiteren Anwendungen der 2D-Seismik in Betracht gezogen worden. Die tiefenkonvertierte Referenzprofile sind als "best guess" angewendet, ohne den analysierten Ungewissheiten zu berücksichtigen.

NAB 14-34 ist ein reiner Prozessierungs-Bericht mit Fokus auf der Methodik der Tiefenkonvertierung, der Konstruktion von Tiefenkarten und der Abschätzung von Unsicherheiten in den Tiefenangaben. Die primäre geologisch-tektonische Interpretation von NAB 13-10 (hier "Basisinterpretation" genannt) ist gänzlich übernommen worden, abgesehen von einigen Anpassungsproblemen, die ausführlich diskutiert werden aber keinen wesentlichen Einfluss auf die geologisch-tektonische Interpretation oder das Einengungsverfahren haben.

4.3.3 Bewertung

Die Experten der 2D-Seismik Reviewgruppe bewerten die Prozessierung und Reprozessierung der vorhandenen reflexionsseismische Daten sowohl in Zeit (NAB 13-10) wie auch in Tiefe (NAB 14-34) als dem heutigen Stand der Forschung und Technik entsprechend. Trotz gewisser Schwächen, insbesondere in Hinblick auf den NAB 14-34, sind die seismischen Referenzprofile in Zeit und in Tiefe für ihre Anwendungszwecke am Ende des SGT Etappe 2 geeignet, wenn auch wegen der mangelnden Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren in den tiefenkonvertierten Profilen umständlich anzuwenden. Die Referenzprofile der Nagra 2D-Seismik und ihre Basisinterpretation sind als "best guess" zu betrachten. Sie sind aber mit beträchtlichen Ungewissheiten behaftet, die man im Auge halten muss und die ihre Aussagekraft innerhalb des jetzigen Projekts zum Teil einschränken.

Um diese Aussage zu illustrieren und präzisieren werden in den folgenden Kapiteln einige der von der Nagra präsentierten und auf den Referenzprofilen basierten Anwendungen (projektorientierte geologisch-tektonische Interpretationen der Referenzprofile) unter die Lupe genommen:

- zur Festlegung der Lagerperimeter aus tektonischer Sicht (Kapitel 4.4)
- zur statistische Analyse (Kapitel 4.5)
- zur Untersuchung von stratigraphisch-sedimentologischen Verhältnissen (Kapitel 4.6)

4.4 2D-Seismik als Basis für die Festlegung der Lagerperimeter

Eine der wichtigsten Anwendung am Ende der Projektphase SGT Etappe 2 ist die Festlegung der "optimierten Lagerperimeter" als erster Schritt zur Abschätzung des "Platzangebots untertage" und zur Einengung der in Etappe 3 zu untersuchenden Standortgebiete. Die von der Nagra angewendete Methodik ist ausführlich in NTB 14-01 beschrieben und beruht auf zwei kritischen Säulen:

- die Bestätigung der in Etappe 1 mit der damals vorhandenen 2D-Seismik auskartierten regionalen Störungszonen durch die Resultate den neuen 2D-Seismik der Jahre

2011/2012 und der dem neuen Prozessierung/Reprozessierung aller 2D-seismischen Linien.

- den Ausschluss von anderen vermutlich ungeeigneten Zonen in der Nähe von regionalen Störungszonen, die in SGT Etappe 3 zu vermeiden wären (zu meidende tektonische Zonen). Die Implikation ist, dass Regionen außerhalb dieser Zonen und innerhalb den geologischen Standortgebiete als geeignet für weitere Untersuchungen in Etappe 3 wären.

Es ist klar, dass die diesbezügliche Interpretation der Referenzprofile aus NAB 13-10 und NAB 14-34 zwei Strategien verfolgen könnte: Entweder (1) zu definieren was "ungeeignet" heißt, um anschließend ungeeignete Zonen auszukartieren und somit die Grenze zwischen "ungeeignet" und "geeignet" festzulegen, oder aber (2) zu definieren was "geeignet" heißt, um anschließend geeignete Zonen auszukartieren und somit die Grenze zwischen "geeignet" und "ungeeignet" festzulegen. Die Nagra verfolgt die erste Strategie, eine "avoidance strategy", was unten Vermeidungsstrategie genannt wird, und gerät, wie unten gezeigt wird, in erhebliche Schwierigkeiten. Eine Alternativstrategie wäre die zweite, eine Eignungsstrategie ("suitability strategy"). Als Beispiel wird dies an zwei geologischen Standorten (Jura Ost und N Lägern) ausgeführt und die Ergebnisse mit der in NTB 14-01 mit der Vermeidungsstrategie ausgearbeiteten "optimierten Lagerperimetern" in den zwei Standorten verglichen.

4.4.1 Vermeidungsstrategie der Nagra ("avoidance strategy")

Wie oben erwähnte ist die Vermeidungsstrategie der Nagra auf zwei Säulen gebaut, die Ausscheidung von regionalen Störungszonen und die Festlegung von um diese Zonen liegende zu meidende tektonische Zonen. Diese werden unten separat betrachtet.

Regionale Störungszonen

In der Nordschweiz ist auf Grund der 2D-Seismik ein Netzwerk von komplexen Störungszonen bekannt geworden, die sich von einer Seismik-Linie zu den umgebenden Linien gut verfolgen ließen und deswegen als "regional" bezeichnet werden. Es gibt weitgehende Einigkeit darüber, dass diese Zonen bei der Suche nach geeigneten geologischen Tiefenlagern vermieden werden müssen. Die Lokationen und die Verläufe dieser regionalen Strukturen waren schon in der Projektphase SGT Etappe 1 auf Grund der damals vorhandenen 2D-Seismik festgelegt und werden größtenteils durch die neue 2D-Seismik in Etappe 2 bestätigt. Die neue Seismik erhärtet auch die Ansicht, dass keine weiteren regionalen Störungszonen gefunden werden. Auf dieser Basis ist die bisherige Lokalisierung und Umgrenzung der geologischen Standortgebiete nachvollziehbar. Die definitive Karte der regionalen Störungszonen ist, zum Beispiel, in NTB 14-02 Dossier II, Fig. 4.4-1, dokumentiert und die einzelnen Zone sind in NTB 13-10, Kapitel 6, in Detail charakterisiert (mit Zusammenfassung in NTB 14-02 Dossier II, Abschnitt 4.4.1). Die Verbindung zwischen der untiefen Tektonik des Mesozoikums und den tieferen Bruchtektonik des darunterliegenden Permokarbons, besonders die Lage der großen Trogrand-Störungen, ist ausführlich in NAB 14-17 diskutiert.

Zu meidende tektonische Zonen

Die zu meidenden tektonischen Zonen sind generell um die regionalen Störungszonen ausgebildet (NTB 14-02 Dossier II, Fig. 4.4-1). Es fehlt aber in den Nagra-Unterlagen eine genaue Definition derart, dass die Zonen in den seismischen Profilen auf Grund des Strukturbildes identifiziert werden können, besonders hinsichtlich ihre Erstreckung ins Innere der Standortgebiete (Innengrenze) die man eindeutig als potenziell geeignet beurteilen würde, also die Lagerperimeter. Dass

eine Kategorie wie zu meidende tektonische Zone existiert ist nachvollziehbar, aber die Lokationen und Verläufe der Innengrenze scheinen trotzdem meist willkürlich. Die in NTB 14-01 dargestellte zu meidenden tektonischen Zonen sind im Grunde als Expertenbeurteilungen seitens der Nagra zu betrachten. Sie basieren nicht auf gut definierten strukturellen Kriterien. Die in vielen Kärtchen eingezeichneten Innengrenze (zwischen zu meidende und nicht zu meidende, d.h. scheinbar günstige, Zonen) die auch als Grenze der optimierten Lagerperimeter dienen sollen, ist also nicht in Detail nachvollziehbar.

Wie oben erwähnt, sind die von der Nagra auszuschließenden Zonen ausserhalb der regionalen Störungszonen unklar definiert. Als erstes werden Zonen im "Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen, welche mehrheitlich mit dem Nordschweizer Permokarbondrog assoziiert sind" ausgeschlossen, und die Ausschlüsse beruhen " in erster Linie auf Modellvorstellungen zur Geodynamik, sowie Erfahrungen aus den 3D-seismischen Untersuchungen im Zürcher Weinland " (NTB 14-02 Dossier II, S. 72-75). Dies betrifft vor allem die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost und die ausgeschlossenen Zonen sind in Abbildungen 4.4-4, 4.4-5 und 4.4-6 in NTB 14-02 Dossier II als Karte und im Profil dargestellt. Zweitens werden zu meidende tektonische Zonen im Einflussbereich von "Antiklinalstrukturen im Nahbereich des Faltenjuras aufgefasst". Allerdings ist "von dieser Art zu meidender tektonischer Zonen ... ausschliesslich das Standortgebiet Jura-Südfuss betroffen." (NTB 14-02 Dossier II, 72-75 und Abbildung 4.4-7).

Zusätzlich zu dem Umstand, dass die "Definition" von zu meidenden tektonischen Zonen qualitativ-generisch und deshalb nicht geeignet ist, nachvollziehbare Schlussfolgerungen zu erlauben, ist die Dokumentation bei Weitem nicht vollständig. Insbesondere ist die kritische Information (Grenzlinie zu Regionen die man eindeutig als potenziell geeignet beurteilen würde) nicht in den seismischen Referenzprofilen eingezeichnet, und in den Karten, in denen die Grenzlinien eingezeichnet sind, fehlen die seismischen Linien (die es ermöglichen würden, die Grenzlinien in den Referenzprofilen selbst zu identifizieren). Bezüglich der "Grundgebirgsstörungen" ist ein Problem, dass sich solche nur andeutungsweise identifizieren lassen und ihre Existenz nie verifizierbar sein wird. Eine Neuinterpretation des Grundgebirges und des nordschweizerische Permokarbondrogs ist von Experten der Nagra im Rahmen von SGT Etappe 2 unter Anwendung der Resultate der neuen 2D-Seismik zwar durchgeführt worden (NAB 14-17). Da die seismischen Daten der submesozoischen Einheiten immer noch, wie auch schon früher, sehr geringe Kontraste aufweisen und gute Reflektoren fehlen, bleibt die Interpretation spekulativ. Obwohl sie auf langjährigen Forschungen und eine sehr grosse Menge von geologischen und geophysikalischen Daten basiert, bleibt diese neue Synthese eine Arbeitshypothese, die nicht verifiziert werden kann. Die von der Nagra vorgeschlagene Interpretation der Bruchsysteme ist sicher plausibel, aber eben nur eine von verschiedenen Möglichkeiten, die Daten zu betrachten. Die Lokationen und Verläufe der grossen südlichen und nördlichen Randverwerfungen des Permokarbondrogs sind wahrscheinlich mehr oder wenig belastbar. Trotzdem sind diese Resultate nicht als eine solide Grundlage für die Definition von zu meidenden tektonischen Zonen geeignet.

Da die Definition der zu meidenden tektonischen Zonen qualitativ-generisch ist, stellt sich die Frage, ob die Abgrenzungen als konservativ zu betrachten seien. Diese Frage ist im Falle des Standortgebietes Zürich Nordost (wo es mit Hilfe der 3D-Seismik in diesem Gebiet festgelegt wird) mit «ja» zu beantworten. Im Falle des Standortgebietes Nördlich Lägern, ist die Abgrenzung der Nagra meiner Meinung nach nicht konservativ genug (siehe unten, nächste Abschnitt). Auch im Falle von Jura Ost ist die Abgrenzung der Nagra fraglich. Die Siggenthal-Störungszone läuft

in das Standortgebiet Jura Ost hinein und «stirbt» (NTB 14-02 Dossier II, Fig. 4.4-6). In der Fortsetzung dieser Störungszone ist aber höchst wahrscheinlich ein tektonisch beeinflusstes Gebiet zu erwarten («tip region» - wie bei der Eppenberg-Antiklinale in Jura Südfuss, NTB 14-02 Dossier II, Fig. 4.4-7) Dies ist im nächsten Kreuzprofil (11-NS-08) andeutungsweise vorhanden, was aber aufgrund der niedrigen Auflösung der 2D-Seismik nicht klar herauskommt. Dass keine zu meidende tektonische Zone in dieser Gegend eingezeichnet ist, ist aber sicher keine konservative Interpretation. In Allgemeinen kann man sagen, dass die Nagra-Definition der zu meidenden tektonischen Zonen eine sehr grosse Elastizität aufweist, zu gross um den Interpretationen der Nagra viel Vertrauen zu schenken.

In NTB 14-01 werden diese unklar definierten zu meidenden tektonischen Zonen als ein wichtiger ersten Schritt der Methodologie zur "Abgrenzung optimierter Lagerperimeter" angewendet. Danach kommen verschiedene Optimierungsschritte und die Ausarbeitung verschiedener alternativer Lagerperimeter mit entsprechenden Flächenzahlen (Arealen angegeben auf 0.1 km² genau!). In NTB 14-01, Beilage B, sind die Karten zusammen mit Tiefentabellen für die verschiedenen Alternativen gezeigt, wobei die Tiefen auf 1 m genau angegeben sind. Die Darstellung erfolgt in sehr kleinen Karten mit verschiedenen sich überlagernden Höhenkurven, die deshalb sehr schwer lesbar sind. Die angegebenen Genauigkeiten (Arealen zu 0.1 km², Tiefen zu 1 m) sind sicherlich illusorisch, wenn man sich erinnert, dass sie auf den Ergebnissen der 2D-Seismik beruhen, deren grosse Ungewissheiten oben und in Kapitel 3 diskutiert wurden. In NTB 14-01, Kapitel 4, wird Nichtexperten und der Öffentlichkeit eine Wissenschaftlichkeit und Quantifizierbarkeit der Ergebnisse der 2D-Seismik vorgetäuscht, die einfach nicht existiert.

4.4.2 Eignungsstrategie ("suitability strategy") als Alternative

Im vorangehenden Abschnitt ist die Erkundung günstiger Bedingungen für ein Tiefenlager mittels 2D-Seismik auf die Festlegung und Vermeidung von als tektonisch ungünstig zu betrachteten Zonen fokussiert ("Vermeidungsstrategie"). Dies ist offensichtlich die Hauptstrategie der Nagra in SGT Etappe 2. Die Alternativstrategie, nämlich die Festlegung der am wenigsten tektonisch überprägten, also der geeignetsten, Abschnitte in jedem seismischen Profil ("Eignungsstrategie"), ist nicht erwähnt und wurde offensichtlich nicht in Erwägung gezogen. Dies erstaunt auch deshalb, weil Erkundungen mittels 2D-Seismik (z.B. in der Ölindustrie) als die Suche nach gewünschten oder vermeintlich günstigen Bedingungen angesehen wird - mit der Absicht nur solche Bedingungen weiter mit Bohrungen oder 3D-Seismik zu untersuchen. Es ist klar, dass jede der beiden Strategien die jeweils andere implizit enthält, und meisten werden beide Strategien parallel verfolgt, um ein ganzheitliches Bild zu gewinnen. Die Nagra hat sich aber hauptsächlich mit der Vermeidungsstrategie beschäftigt.

Als Illustration wird unten versucht, die seismischen Referenzprofile vom Standpunkt der Eignungsstrategie zu interpretieren, am Beispiel der Standortgebiete Jura Ost and Nördlich Lägern. Diese Alternativstrategie erlaubt was bei der Vermeidungsstrategie fehlt, nämlich die Möglichkeit einer klaren Definition dessen was in den Referenzprofilen als scheinbar geeignet gelten soll, nämlich: *„ein strukturelles 2D-seismisches Bild von tektonisch ungestörten Bedingungen (d.h. geradlinig laufende Reflektorensuren) in gut ausgebildeten, kontinuierlichen Top Lias und Top Muschelkalk Reflektoren (d.h. mit Qualitätsbezeichnung "gut definiert", ausnahmsweise mit kleineren Überbrückungen als "ausreichend definierten")“*. In jedem 2D-seismischen Referenzprofil kartiert man wo im nächsten Schritt der Untersuchungen eine oder mehrere Sondierungsbohrun-

gen und/oder eine 3D-Seismik-Kampagne lokalisiert werden soll, d.h. wo scheinbar günstige Bedingungen (kleinster Einfluss der Tektonik) anzutreffen sind, und wo die Explorierbarkeit (einfachste strukturelle Situation) am besten ist, um das Ziel des Projekts zu erreichen. Weitere Erkundungen mit Bohrungen oder 3D-Seismik ausserhalb solchen Regionen würde erhöhten Risiken eines Scheiterns mit sich bringen, die normalerweise nicht zu verantworten wären.

Die Resultate der Anwendung einer solchen Eignungsstrategie im Falle der Standortgebiete Jura Ost und Nördlich Lägern sind im Anhang 1 (Datengrundlagen) und in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 (Interpretation) zusammengefasst. Es wird an den Referenzprofile in Zeit in NAB 13-10 ausgeführt, da in NAB 14-34 leider die Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren fehlen. Regionen in denen der Reflektor Top Lias als "schlecht definiert / konzeptuell" bezeichnet ist, werden als nicht geeignet für weitere Untersuchungen wegen reduzierter Explorierbarkeit betrachtet. Zunächst werden unten die Resultate der beiden Standortgebiete als Abbildungen präsentiert, und dann werden die Resultate unter einander und mit den "optimierten Lagerperimetern" in NTB 14-01 verglichen.

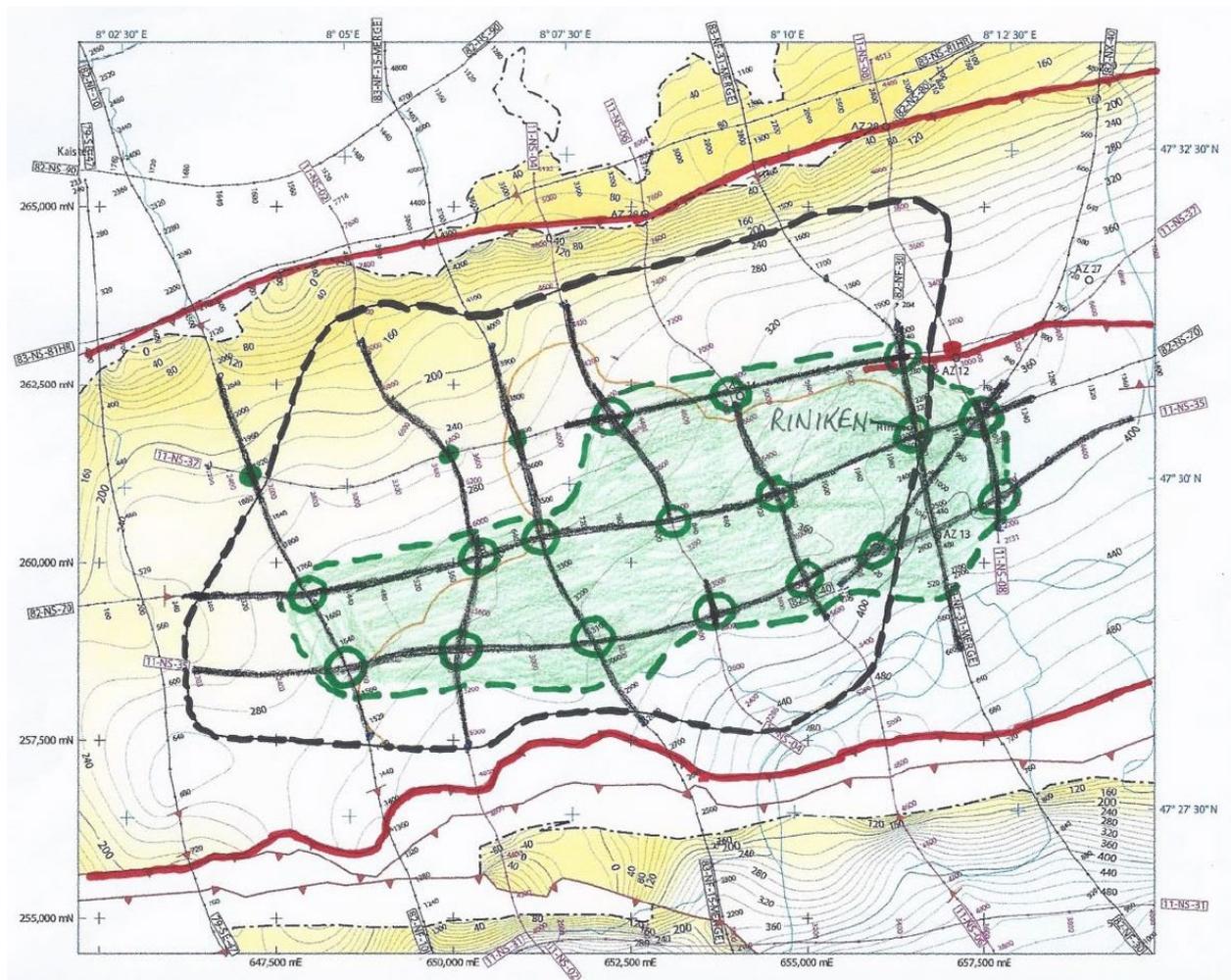


Abbildung 4-1: Streifenkarte der seismischen Linien mit geschätzten Bereichen (dicke schwarze Linien) im Standortgebiet Jura Ost die nach Definition (siehe unten) für weitere Untersuchungen, wie neue Sondierungsbohrungen oder eine 3D-Seismik Kampagne, aus tektonischer Sicht zu priorisieren wären.

Definition von geeigneten Verhältnissen: „Das strukturelle Muster des 2D-seismische Bilds im Referenzprofil zeigt tektonisch ungestörte Bedingungen (geradlinig laufende Reflektorensuren)

in gut ausgebildeten, kontinuierlichen Top Lias und Top Muschelkalk Reflektoren (Qualitätsbezeichnung in NAB 13-10 "gut definiert", ausnahmsweise mit kleineren Überbrückungen, "ausreichend definierten"). Gegenden mit dem Top Lias Reflektor als "schlecht definiert / konzeptuelle" bezeichnet werden a priori als Gebiete mit niedriger Explorierbarkeit und deshalb als ungeeignet für weitere Untersuchungen betrachtet.“

Die Daten (CMP Endpunkte der nach Definition in 2D als scheinbar geeignete Abschnitte der Referenzprofile) sind in Anhang 1 tabelliert. Wenn sich zwei Linien fast senkrecht kreuzen sind drei Situationen möglich:

- (1) Beide Referenzprofile zeigen scheinbar geeignete Verhältnisse (nach der obigen Definition). Diese sind mit einem grünen Ring angezeigt und markieren die aus Sicht der Erkundung nach tektonisch ungestörten Bedingungen Erkundungsziele von erster Priorität.
- (2) Nur ein Referenzprofil zeigt scheinbar geeignete Verhältnisse. Das andere Profil hingegen ist mehr tektonisch gestört und erfüllt die Definition nicht. Deshalb sind solche Kreuzungspunkte (grüne Punkte) nur als Erkundungsziele von zweiter Priorität zu betrachten.
- (3) Beide Referenzprofile zeigen Bedingungen, die die Definition nicht erfüllen, und der Kreuzungspunkt entfällt deswegen als Erkundungsziel (rote Punkte - Ziele von dritter Priorität).

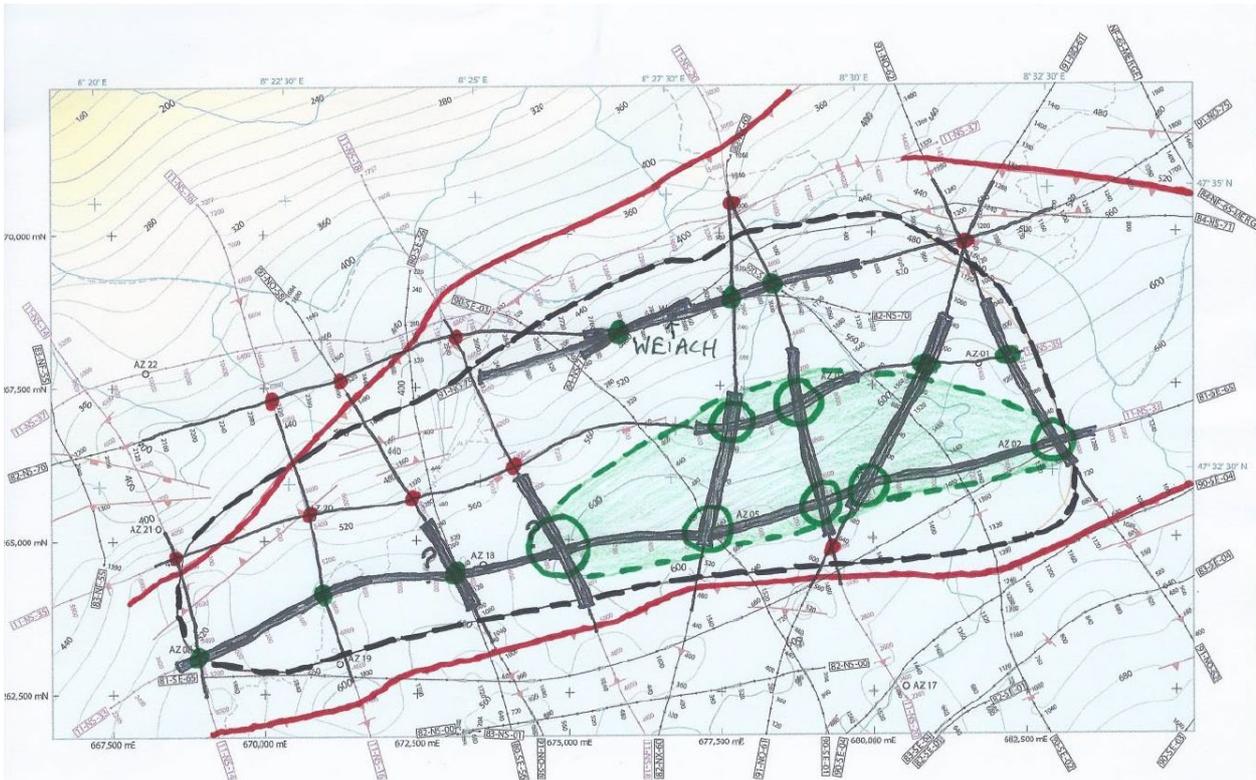


Abbildung 4-2: Streifenkarte der seismische Linien mit geschätzten Bereichen (dicke schwarze Linien) im Standortgebiet Nördlich Lägern die nach Definition (siehe oben) für weitere Untersuchungen, wie neue Sondierbohrungen oder eine 3D-Seismik Kampagne, aus tektonischer Sicht zu priorisieren wäre (für Erklärung, siehe Text zur Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1 zeigt, dass ein relativ großes zentrales Gebiet innerhalb der Grenze des geologische Standortgebiets Jura Ost existiert, das für weitere Untersuchungen in SGT Etappe 3 aus tektonischer Sicht geeignet wäre, erkundungsmäßig von erster Priorität gemäß die Definition der Eignungsstrategie. Das Gebiet (mit grüner Linie eingrahmt in Abbildung 4-1) deckt sich grob mit dem Gebiet "maßgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2)" für das HAA-Lager

(e.g. NTB 14-01, Fig. 4.2-22) und zeigt, dass die Vermeidungsstrategie und die Eignungsstrategie in diesem Standortgebiet ungefähr zur gleichen Resultat führt.

Im Falle des Standortgebiets Nördlich Lägern ist die Situation etwas anders. Das Gebiet, das die Definition von "Eignung" (scheinbar nicht tektonisch überprägt, gute Explorierbarkeit) im Sinne einer Erkundungsstrategie erfüllt, ist viel kleiner als das am Ende von Etappe 2 bestimmte geologische Standortgebiet. Noch dazu es liegt weiter südöstlich als der von der Nagra definierte "maßgebenden Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2)" für ein HAA-Lager (NTB 14-01, Fig. 4.2-21), mit sehr wenig Überlappung. Vermutlich war in diesem Fall die Tiefe des Opalinustons im Gebiet von den besten Bedingungen (tiefer als 800 m) zu groß und hat die Nagra veranlasst, das Erkundungsziel nach Nordwesten zu verschieben, in ein von der Eignungsstrategie her als Erkundungsziel von zweiter Priorität zu betrachtendes Gebiet (tektonisch höher beansprucht, niedrigere Explorierbarkeit). Das heißt, dass das Standortgebiet Jura Ost als geeigneter als das Standortgebiet Nördlich Lägern erscheint, wenn die Resultate der Vermeidungsstrategie und der Eignungsstrategie verglichen werden. Wenn man die Resultate der Eignungsstrategie untereinander vergleicht (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2), ist es klar, dass ein viel größeres Gebiet von Jura Ost ist als Erkundungsziel von erster Priorität zu betrachten als in Nördlich Lägern (auch ohne Berücksichtigung der Tiefe). Das bedeutet, dass Nordlich Lägern generell mehr tektonisch beansprucht ist als Jura Ost, was mit der allgemeinen Beurteilung der Nagra übereinstimmt (Jura Ost "sehr günstige Bedingungen"; Nördlich Lägern "möglicherweise weniger günstig"; siehe NTB 14-02 Dossier II, Abschnitt 4.5)

4.4.3 Bewertung

Die Anwendung der Resultate der 2D-Seismik bei der Festlegung der Lagerperimeter innerhalb den geologischen Standortgebieten ist zweckmässig und im Einklang mit Anwendungen dieses Erkundungswerkzeugs für viele Typen von Untergrundexploration weltweit. Dabei aber verfolgt die Nagra fast ausschliesslich eine Vermeidungsstrategie, mit dem Ausgangspunkt der Festlegung der regionalen Störungszonen und ihren assoziierten zu meidenden tektonischen Zonen. Leider ist aber die Definition solcher Zonen zu unklar, um die Auskartierung der kritischen Grenze zwischen ihnen und Regionen, die scheinbar geeignet sind zu erlauben, um potentiell guten Bedingungen für ein Tiefenlager zu identifizieren. Üblicherweise wird in der untertägigen Exploration eine Vermeidungsstrategie mit einer Eignungsstrategie verbunden, die zu einer Definition der scheinbar geeigneten Objekte, die auszukartieren wären, führt. Eine solche Strategie findet sich nicht in den Nagra-Unterlagen.

Zusätzlich zur Ermangelung einer Eignungsstrategie sind in den Nagra-Unterlagen andere Probleme der Methodik zur Festlegung der optimierten Lagerperimeter zu wenig berücksichtigt. Erstens werden die systembedingten Ungewissheiten, die während der Prozessierungen/Reprozessierung der 2D-seismischen Daten entstanden und teilweise sehr detailliert beschrieben sind, bei der weiteren Anwendung der Referenzprofilen sehr wenig benutzt (z.B. um die Angaben zu Tiefen und Flächen zu relativieren). Zweitens werden die Datengrundlagen und die Interpretationen zu oft nicht klar genug auseinandergehalten (z.B. wird zu wenig Gebrauch von Streifenkarten und zu viel Gebrauch von Karten ohne seismischen Profillinien gemacht, siehe unten). Drittens ist unter Anwendung der Vermeidungsstrategie die Definition der zu meidenden tektonischen Zonen zu qualitativ-generisch, als dass sich die kritische Grenze zwischen diesen Zonen und den scheinbar geeigneten Zonen kartieren liesse (und ist wahrscheinlich deswegen nicht in den 2D-seismischen Referenzprofilen eingezeichnet). Aus allen diesen Gründen erzeugt die Prozedur

der Nutzung der Referenzprofile zur Festlegung der Lagerperimeter ein Gefühl von Willkür, was keineswegs notwendig wäre und der Sache eher schadet als weiterhilft.

4.5 2D-Seismik als Basis für statistische oder quantitative Analysen

Die Anwendung von 2D-seismischen Profilen in einem groben regionalen Netzwerk wie in der Nordschweiz ist zweckmässig für die Erkundung des Felsuntergrundes, wo es um die Lokalisierung von günstigen Gebieten für weitere projektorientierte Untersuchungen (Sondierungsbohrungen, 3D-seismische Kampagne, usw.) geht. In diesem Sinne wären die Nagra-Untersuchungen in SGT Etappe 2 unter Anwendung einer richtigen Interpretationsmethodik, wie in Kapitel 4 diskutiert, durchaus sinnvoll, und die Resultate bei der Auswahl der in Etappe 3 zu untersuchenden Standortgebiete durchaus brauchbar gewesen. Hingegen ist der Anwendung der 2D-Seismik für weitergehende statistische oder semi-quantitative Analysen mehr als fraglich und führt meist zu nicht belastbaren Aussagen. Nur 3D-seismische Untersuchungen, bei denen die Linienabstände einige Zehner Metern (statt ein Paar Kilometer) betragen, lassen sich auf dieser Weise analysieren.

Dieser Grundsatz scheint manchmal in den Nagra-Unterlagen in Vergessenheit geraten zu sein. Die Linienabstände der Nagra 2D-seismische Profile sind zu gross, um statistische Methoden, z.B. zur Konstruktion von Isohypsen (NTB 14-02 Dossier II) oder zur Abschätzung von subseismischen Bruchmustern (NAB 14-88), anwenden zu können. Auch muss in der 2D-Seismik überall die Datengrundlage klar von der Interpretation getrennt werden, weil die Rohdaten auf die wenigen Profillinien konzentriert sind, separiert durch grosse Gebiete ohne Daten oder mit sehr wenigen Daten (einzelnen Bohrungen). Diese Trennung von Datengrundlage und Interpretation hätte entweder durch den konsequenten Gebrauch von "strip maps" ("Streifenkarten"- die die Interpretation nur entlang der seismischen Profillinien darstellen) oder durch die konsequente Einzeichnung der seismische Profillinien in alle Kartenunterlagen geschehen sollen. Diese Konsequenz ist in den Nagra-Unterlagen nicht zu finden und die Zusammenhänge und Ungewissheiten im Kartenmaterial sind oft schwierig zu durchschauen. Für das Standortgebiet Jura Ost, zum Beispiel, ist der Zusammenhang zwischen der Strukturkarte des Top Lias in Zeit (TLi in NAB 13-10, Beilage 7.3-3), die "Streifenkarte" von TLi (NAB 14-34, mit den Tiefenbestimmungen längs der Linien), die Karte der Ungewissheiten von Tiefenangaben TLi (NTB 14-02, Anhang A3-10, mit Profillinien eingezeichnet), die Strukturkarte mit 20 m Höhenlinien für TLi (NTB 14-02 Dossier II, Beilagen A3-8, ohne Profillinien) und optimierte Lagerperimeter-Karten (NTB 14-01, Abb. 4.2-1 bis -23, alle Karten ohne Profillinien) schwer zu überblicken. Besonders gravierend ist das Fehlen von Profillinien in den Karten des NAB 14-01, wo Abschätzungen von Flächen (mit 0.1 m² Genauigkeit!) und Tiefen (zum Teil mit 1 m Genauigkeit!) gemacht werden und zwischen den geologischen Standorten verglichen werden, ohne auf der Ungewissheiten in den Datengrundlagen aufmerksam zu machen (z.B. ohne die konsequente Einzeichnung der seismischen Profillinien in die Karten). Die 2D-Seismik liefert nicht die Daten, die statistische oder quantitative Analysen erlauben, bei einer strikten Trennung von Datengrundlagen und Interpretation und bei konsequenter Berücksichtigung der vielen Quellen von Ungewissheiten, die kaum die oben erwähnten Genauigkeiten rechtfertigen.

Eine andere statistisch-quantitative Analyse der 2D-seismischen Daten und der daraus resultierenden Referenzprofile ist das Versuch, das Vorkommen von subseismischen Brüchen (insbesondere "anordnungsbestimmenden Störungen" innerhalb dem bestimmten "massgebenden Fall

für die Einengung" zu analysieren (NAB 14-88). Die Analyse ist auf einer gut-etablierten statistische Methodik basiert (DFN modelling), die häufig in den skandinavischen nuklearen Entsorgungs-Programmen zur Anwendung gekommen ist. Die Methode ist von einer Anzahl von intrinsischen Problemen begleitet, vor allem einer Reihe von nicht sehr realistischen Annahmen. Trotzdem, wenn hinreichend viele Daten systematische gesammelt werden können, kann sie zu sehr wichtigen Einsichten in standortspezifische Bruchsysteme führen. Bericht NAB 14-88 ist also als eine wichtige "Trockenübung" zu betrachten, eine Vorbereitung darauf, dass nach der Realisierung der 3D-seismischen Untersuchungen in SGT Etappe 3, hinreichende Bruchdaten vorhanden sein werden, um eine solche Analyse machen zu können. Mit der 2D-Seismik kann aber bei Weitem keine statistisch akzeptable Datensammlung gewonnen werden und ist auch in diesem Fall nicht erreicht worden.

4.5.1 Bewertung

Das Vorgehen der Nagra in NAB 14-88 mit den vorhandenen 2D-seismischen Daten ist fachlich nicht akzeptabel und die Resultate sollten nicht als Teil der Argumentation zur Standortauswahl übernommen werden.

4.6 Detailanalyse der seismische Daten in stratigraphisch-sedimentologischer Hinsicht

In Etappe 1 der SGT waren zwei potenzielle Wirtsgesteine zusätzlich zum Wirtsgestein Opalinuston vorgeschlagen: Effinger Schichten (für SMA im Standortgebiet JS) und 'Brauner Dogger' (für SMA in den Standortgebieten NL und ZNO). Außerdem bilden diese Formationen Teile der oberen Rahmengesteine in verschiedenen Standortgebieten und sind deshalb von besonderem Interesse. Deshalb hat die Nagra versucht, mehr Information aus den 2D-Seismik Daten zu holen, als die reine Identifikation und Kartierung von stratigraphischen Leithorizonten und tektonischen Strukturen. Diese, die interne Struktur in stratigraphisch-sedimentologischer Hinsicht betreffende Arbeit ist teilweise gelungen und die Resultate sind in zwei NABs (NAB 14-57 und NAB 14-58) ausführlich dokumentiert.

4.6.1 Effinger-Schichten

Die seismische Detailanalyse erlaubt die Identifizierung von zwei internen Hilfshorizonten, near Top Effinger (nTEff) und near Top Gerstenhübel-Schichten (nTGer), die auch die Formation in zwei seismische Fazieseinheiten (Obere und Untere Effinger Schichten) unterteilen. Diese Einheiten lassen sich regional in den seismischen Daten verfolgen und in mehreren Bohrungen identifizieren. Sie zeigen systematische Mächtigkeits-Änderungen, die aber nicht eindeutig mit Grundgebirgsstrukturen in Verbindung gebracht werden können, und stellenweise auch Phänomene, die als sedimentäre Groß-Strukturen interpretiert werden. Im Allgemeinen ist das seismische Faziesbild durch Bündel von subparallel gelagerten ausgeprägten Teilreflektoren ("Sheet"-Geometrie) gekennzeichnet, die als Abbild von Kalkband- und Kalkmergel-Abfolgen interpretiert sind. Nach den Autoren ist jedoch die Auflösung der Seismik generell unzureichend, um die laterale Ausbreitung von einzelnen Kalkbänken zu bestimmen.

4.6.2 'Brauner Dogger'

Die seismische Detailanalyse zeigt, dass im 'Braunen Dogger' (zwischen dem seismischen Hilfshorizont 'near Top Opalinuston' und dem Markerhorizont Basis Malm) keine weiteren Hilfshorizonten seismisch auskartiert werden können. Trotzdem können auf Grund von Vergleichen mit

den lithostratigraphischen und bohrlochgeophysikalischen Daten aus mehreren Bohrungen einige Reflexionsmuster in der 2D-Seismik als seismische Faziesseinheiten identifiziert werden, die Hinweise auf signifikante laterale Fazieswechsel geben. Obwohl teilweise von konzeptionellem Charakter erlaubt die seismische Detailanalyse eine Unterteilung in einen oberen Teil (wenig reflektiv) und einen unteren Teil (stark reflektiv, mit linsenartigen transparenten Intervallen). Mit Hilfe lithostratigraphischen Bohrlochdaten und von regionalen Vergleichen werden sedimentologische und stratigraphische Ideen entwickelt, die aber nach den Autoren nur als Denkanstöße gemeint sind, als mögliche Lösungen mit unverbindlichem Charakter. In Bezug auf den Einfluss der Grundgebirgstektonik auf die Faziesverteilung wird aber festgehalten, dass Mächtigkeitssprünge im 'Braunen Dogger' Hinweise auf eine mitteljurassische Reaktivierung der südlichen Randverwerfung des Permokarbons südlich des Standortgebiets NL geben. Diese Aussage wird aber von den Autoren, wegen der Ungewissheiten in den seismischen und gravimetrischen Daten, als nicht belastbar beurteilt.

4.6.3 Bewertung

Die Detailanalyse der 2D-Seismik hinsichtlich Reflexionsmuster innerhalb der beiden Formationen Effinger-Schichten und 'Brauner Dogger' ist sehr sorgfältig ausgeführt und dokumentiert. Die Autoren beeindrucken durch ihre klare Exposition und ihre wissenschaftliche Herangehensweise. Beide sind anerkannte Experten in je einem Gebiet und zeigen eine sehr gelungene Zusammenarbeit. Sie haben einen guten kritischen Abstand zu ihren Resultaten und Interpretationen. In ihren Stellungnahmen zu den definierten Zielsetzungen der Arbeit berücksichtigen sie die inhärenten Ungewissheiten der 2D-Seismik gebührend. Die Analyse ist eine wertvolle Ergänzung zu den vielen vorangegangenen Arbeiten, bringt aber keine neuen, belastbaren und projekt-relevanten Ergebnisse.

4.7 Beantwortung der ENSI-Leitfragen und -Ergänzungsfragen zu den Ergebnissen der 2D-Seismik Kampagne

ENSI-Leitfragen

Frage 5.3: Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen, von anordnungsbestimmenden Störungen und von zu meidenden tektonischen Zonen auf der Basis der reprozessierten und neu aufgenommenen Seismiklinien nachvollziehbar?

Die Frage muss differenziert beantwortet werden.

Für regionale Störungen sind derer Lokation und Verlauf nachvollziehbar. Das Muster der regionalen Strukturen aus SGT Etappe 1 ist grösstenteils durch die neue 2D-Seismik in Etappe 2 bestätigt worden.

Für die zu meidenden tektonischen Zonen fehlt eine klare Definition. Sie basieren auf konzeptionellen Annahmen (Zusammenhang zwischen Grundgebirgs- und darüber liegenden Antiklinalstrukturen). Die Abgrenzung der zu meidenden tektonischen Zonen ist auch nicht in den eigentlichen seismischen Profilen (Beilagen bzw. Anhänge in NAB 13-10 bzw. NAB 14-34) eingezeichnet. Sie ist nur in einigen wenigen Figuren in NTB 14-02 Dossier II und in den vielen kleinen Kärtchen in NTB 14-01 eingezeichnet (in denen die seismischen Profillinien fehlen).

Für die anordnungsbestimmenden Störungen sind derer Lokation nur sichtbar, wenn der vertikale Versatz mehr als 20-25 m beträgt, ansonsten sind sie nicht sichtbar in der 2D-Seismik. Der Verlauf der anordnungsbestimmenden Störungen ist nicht bestimmbar da diese Strukturen per Definition an der Grenze der seismische Auflösung liegen und von einer seismischen Linie zu anderen nicht korrelierbar sind. In NAB 14-88 wird seitens Nagra versucht, mit statistischen Methoden ein Model dieser Strukturen zu konstruieren. Wenn 3D-Daten vorhanden wären, wäre das ein brauchbarer methodischer Ansatz. Die 2D-Seismik liefert aber viel zu wenige Daten, um eine solche statistische Methode anzuwenden. Zur Einengung ist der Gebrauch dieser Resultate deshalb nicht sinnvoll.

Frage 5.1 und 5.4: Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien plausibel und vollständig?

Im Grossen und Ganzen ist die von der Nagra präsentierte geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien plausibel. Die geologisch-tektonische Interpretation in NAB 14-34 (tiefenkonvertierte Profile) ist von der in NAB 13-10 (zeitmigrierte Profile) grösstenteils übernommen worden, obwohl es auch Unterschiede gibt, die darauf hindeuten, dass die beiden Berichte nicht immer kompatibel sind. Eine Beschreibung der wesentlichen Abweichungen bzw. Uminterpretierungen ist mit einigen Beispielen in NAB 14-34 gegeben. Diese und andere kleinere strukturelle Änderungen werden von den Experten von swisstopo, in Zusammenhang mit ihrem Review des Berichts NAB 14-105 (Bilanzierung der geologischen Interpretation) diskutiert.

Frage 5.5: Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Der Mehrdeutigkeit der Modelle wurde im Grossen und Ganzen genügend Beachtung geschenkt. Diese Aussage stützt sich vorwiegend auf die Diskussionen in verschiedenen Fachsitzungen und Workshops und weniger auf die Darstellungen in den verschiedenen Berichten, in denen jedoch einige Beispiele von möglichen Alternativen ausgeführt sind. In Allgemeinen sind die Interpretationen in den Quellprofilen (in NAB 13-10 resp. NAB 14-34) als die von der Nagra bevorzugten Interpretationen anzusehen. In Diskussionen auf den Fachsitzungen wurde die Wahl der bevorzugten Interpretationen von den Nagra-Experten auf überzeugende Weise dargestellt. Die Interpretationen können als "best guess" angesehen werden.

Frage 4.5 (angepasst): Sind die Angaben der Tiefenlage sowie entsprechende Unsicherheiten der Horizonte «Top Lias», «nTOpa» und «Basis Malm» belastbar?

Die tiefenkonvertierte Profile zeigen die verschiedenen Horizonte gleichmässig als kontinuierlich durchgezogene Linien, ohne Qualitätsbezeichnung (eine solche wird nur in den Zeitinterpretationen angegeben). Sie werden für die Konstruktion von Isohypsen- und Neigungskarten angewendet, ohne dabei in genügender Weise zu unterstreichen, dass die resultierenden Tiefenangaben mit grossen, semi-quantitativ abgeschätzten Prozessierungsfehlern behaftet sind. Für den gut und kontinuierlich definierten Markerhorizont "Top Lias" ist dies ein plausibles Vorgehen, wenn dessen Ungewissheiten bezüglich Tiefenlage im Auge behalten wird, und in diesem Sinne belastbar. Anders sieht es bei diskontinuierlich verfolgten Reflektoren, wie "Basis Malm", und beim kaum reflektierenden Hilfshorizonten "near Top Opalinuston" aus, der in den Zeit-Profilen nicht auskartiert ist und nirgends als eigentlicher "Reflektor" vorkommt. Für diese Horizonte wäre die Leitfrage eher negativ zu beantworten, insbesondere wenn es sich um Teile von Profilen handelt, die weit entfernt von Bohrkontrollpunkten liegen. In Allgemeinen muss festgehalten werden,

dass das Vorhandensein von Bohrlochdaten von kritischer Bedeutung ist, was die Tiefen- und Mächtigkeitsangaben und die zugehörigen Unsicherheiten betrifft.

Frage 5.6: Mit welcher Zuverlässigkeit kann aus der Seismik ein Rückschluss auf die laterale Kontinuität von Faziesbereichen im Braunen Dogger und in den Effinger Schichten gezogen werden?

Die Detailanalyse der 2D-Seismik-Daten in Bezug auf die Reflexionsmuster innerhalb der Formationen der Effinger Schichten und des 'Braunen Doggers' (NAB 14-57, NAB 14-58) ist sehr sorgfältig ausgeführt und von hohem wissenschaftlichen Niveau. Die Autoren zeigen in ihrer Arbeit eine beachtenswerte kritische Distanz zu ihren Resultaten und Interpretationen. In ihrer Stellungnahme zu den definierten Zielsetzungen der Arbeit werden die inhärent in der 2D-Seismik vorhandenen Ungewissheiten gebührend berücksichtigt. Die Analyse ist eine wertvolle Ergänzung zu den vorangehenden Arbeiten (NAB 12-51, NAB 13-16, NAB 13-10, NAB 14-34), sie bringt schlussendlich aber keine neuen für die Einengung in Etappe 2 relevanten Ergebnisse.

ENSI-Ergänzungsfragen

Frage 6.1: Ist der Zusammenhang zwischen dem Rand des Nordschweizer Permokarbondrogens, der Flexur (NTB 14-01, Dossier II, Fig 4.4-5) und dem Störungsbild aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland belastbar?

Ein Zusammenhang zwischen diesen strukturellen Elementen im Zürcher Weinland (Standortgebiet ZNO) und den zu meidenden tektonischen Zone im nördlichen Bereich des Standortgebietes NL ist möglich, aber nicht zwingend. Das Störungsbild aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland ist in den regionalen seismischen Linien durch das gleiche Gebiet kaum sichtbar und wäre nicht unbedingt als "Störungsbild" zu interpretieren. Wie unten ausgeführt (Fragen 1.3 und 1.4) kann die in den regionalen 2D-seismischen Profilen dargestellte Tektonik im nördlichen Teil des Standortgebiets NL auch analysiert werden, ohne Parallelen zu den Bedingungen im Standortgebiet ZNO zu ziehen.

Frage 6.2: Wie aussagekräftig sind die Neigungskarten des Top Lias?

Die Aussagekraft der Neigungskarten des Top Lias ist sehr gering. Die durch weit auseinander liegende regionale Seismiklinien konstruierten Strukturkarten (Isohypsenkarten) basieren auf mit grossen Fehlern behafteten Tiefenangaben und sind daher sehr ungenau. Für die Anwendung gängiger computergesteuerter Geostatistik-Programme sind die auf einzelnen Linien verteilten Datenpunkte ungeeignet. Die daraus resultierenden Neigungskarten sind entsprechend unzuverlässig, auch wegen der sehr geringen Neigungen, die darin unterschieden werden. Die Neigungskarten sind darüber hinaus unvollständig. Es fehlt die Darstellung der seismischen Linien, mit denen gezeigt werden könnte, wo die Karten durch die Daten bestimmt und welche Gebiete dazwischen computerbasiert interpoliert worden sind (d.h. wo effektiv keine Daten vorhanden sind).

Frage 6.3: Ist die von der Nagra auf Basis der 2D-Seismik ausgewiesene Flexur am nördlichen Rand des Standortgebiets NL nachvollziehbar und belastbar?

Die von der Nagra in den Figuren eingezeichnete zu meidende tektonische Zone (zmt-Zone) am nördlichen Rand des Standortgebiets NL ist aufgrund von Beobachtungen entlang den das Gebiet kreuzenden regionalen 2D-seismischen Linien im Grossen und Ganzen nachvollziehbar. Ein Teil von dieser zmt-Zone ist die in der Frage genannte Flexur, die Sigglistorf-Antiklinale, die in den N-S Profile (11-NS-18, 11-NS 20) gut zu beobachten ist. Problematischer ist jedoch die genaue

Lokalisierung des eingezeichneten südlichen Randes der zmt-Zone. Hier existiert ziemlich viel Interpretationsspielraum. Wegen der Unklarheit in der Definition der zmt-Zonen ist die Frage nach "Nachvollziehbarkeit" oder "Belastbarkeit" vielleicht nicht die eigentlich zu stellende Frage, sondern müsste durch die Frage ersetzt werden, ob die dargestellte Grenzziehung konservativ genug ist oder nicht. Ich hätte in diesem Gebiet die Südgrenze der zmt-Zone weiter südlich gelegt (also, ich wäre mehr konservativ gewesen), so wie ich es in meinem 2D-Seismik-Review dargelegt habe.

Frage 6.4: Kann aufgrund der Erfahrungen aus dem Standortgebiet ZNO (Hinweis auf Zusammenhang zwischen Permokarbondrog, Flexur und Strukturzone) für das Standortgebiet Nördlich Lägern eine potentielle Strukturzone antizipiert werden? (Gemäss Erfahrungen aus ZNO können solche Strukturzone erst mit der 3D-Seismik erfasst werden.)

Eine Beantwortung diese Frage macht nur Sinne, wenn aufgrund des Experten-Mandats in unserem Review auch der Einbezug der Resultate aus der 3D-Seismik vorgesehen wäre. Ich habe das Mandat aber so verstanden, dass wir uns ganz bewusst nur auf die Beobachtungen an der regionalen 2D-Seismik konzentrieren sollen. Ob eine Strukturzone wie sie im südlichen Standortgebiet ZNO aufgrund der 3D-Seismik identifiziert worden ist, auch im Standortgebiet NL existiert, kann nicht aufgrund der Ergebnisse aus den regionalen 2D-seismischen Untersuchungen entschieden werden. Wie jedoch unter Punkt 1.3 ausgeführt, zeigt die regionale Seismik im nördlichen Randgebiet des Standortgebiets NL eine relative starke Tektonisierung (im Vergleich zu den Standortgebieten JO und ZNO) und soll deshalb aus meiner Sicht grundsätzlich gemieden werden, unabhängig davon ob diese vergleichbar ist mit der in der 3D-Seismik im Standortgebiet ZNO beobachteten Strukturzone oder nicht.

Frage 7: Ist es fachlich nachvollziehbar und gerechtfertigt, eine unterschiedliche Anzahl an anordnungsbestimmenden Störungen in den Lagerperimeter der Standortgebiete anzunehmen (zum Beispiel dass für die Standortgebiet NL und JS die Anzahl der Störungszonen viel grösser ist als für die anderen)? Wenn ja, was ist die Datengrundlage für diese Annahme?

Die Standortgebiete NL und JS sind ohne Zweifel stärker tektonisiert als die Standortgebiete JO und ZNO, eine Beurteilung die schon vor der Veröffentlichung der Standortauswahl zu SGT Etappe 2 aus den Nagra-Unterlagen zu entnehmen war (vgl. NTB 14-02 Dossier II, Abschnitt 4.5). Was aber die Anzahl der anordnungsbestimmenden Störung innerhalb des für ein Tiefenlager als günstig zu betrachteten Gebiets in diesen Standortgebieten betrifft, ist das Vorgehen der Nagra (wie in NAB 14-88 dargelegt) fachlich nicht akzeptabel und die Resultate sollten seitens des ENSI als Teil der Argumentation zur Standortauswahl nicht übernommen werden.

4.8 Referenzen

NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02 Dossier II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

- NAB 12-51: Sedimentologie und Stratigraphie des 'Brauner Doggers' und seiner westlichen Äquivalente, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-16: Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-17: Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbons: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-57: Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-58: Reflexionsseismische Analyse der 'Braunen Doggers', Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

Anhang 1:

Identifikation der am wenigsten tektonisch überprägten Abschnitte der seismischen Referenzprofile in Zeit (NAB 13-10) für die Standortgebiete Jura Ost und Nördlich Lagern

Datenbasis: **NAB 13-10** Anhang ("alte", reprozessierte seismische Linien) und Beilage 5 ("neue" prozessierte seismische Linien)

Bezeichnungen der Säulen:

1. *Anhang- oder Beilage-Nummer in NAB 13-10*
2. *Nummer der seismische Linien*
3. *Orientierung der seismische Linie: N-S oder S-N (je nach CMP Nummerierung) = quer zum strukturellen Streichen (Querlinien); E-W oder W-E (je nach CMP Nummerierung) = parallel zum strukturellen Streichen (Streichlinien)*
4. *CMP start: Anfang des Abschnitts auf Niveau Tli der als am wenigsten gestört/tektonisiert betrachtet worden ist (scheinbar geeignet für ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston)*
5. *CMP end: Ende des Abschnitts auf Niveau Tli der als am wenigsten gestört/tektonisiert betrachtet worden ist (scheinbar geeignet für ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston)*
6. *Bemerkungen*

1 Anhang- Beilage	2 Linie	3 Orien- tierung	4 CMP start	5 CMP end	6 Bemerkungen
Jura Ost - reprozessierte Linien (NAB 13-10 Anhang)					
A-01	82-NF-10	S-N	1470	2050	but rather undulatory from 1850 onwards
A-02	82-NF-30	N-S	230	600	through Riniken borehole;
A-06	82-NS-70	W-E	270	1350	through Riniken borehole at CMP 1120; 800-920 slight flexure & basement fault (Sigg. anticline)
A-09	82-NX-40	N-S	870	1150	through Böttstein and near Riniken boreholes; below 870, influence of Sigg. anticline
A-13	83-NF-15	S-N	2800	3950	between B5-01 and B5-02
A-14	83-NF-31	N-S	2200	2700	between lines B5-03 and B5-04, through Riniken borehole; north of 1750, start of turn-up towards Man. thrust; faulting assoc. Sigg. anticline 20302130

1 Anhang- Beilage	2 Linie	3 Orien- tierung	4 CMP start	5 CMP end	6 Bemerkungen
Jura Ost - neue Linien 2011/12 (NAB 13-10 Beilagen 5)					
B5-01	11-NS-02	S-N	4950	7050	somewhat undulating
B5-02	11-NS-04	S-N	3450	4400	?layout det. fault at ca.3100-3400; undulatory up to 3100
B5-03	11-NS-06	S-N	5600	6600	south of 5600, flexure due to basement faulting and/or Jura thrust zone; north of 6700, disturbed conditions above basement fault and Man. thrust
B5-04	11-NS-08	S-N	2200	2700	profile just to E of Riniken borehole (ca. 2700); fault at 3050 (?Sigg. anticline), after that, flexure related to Man. thrust and major basement faulting?
B5-13	11-NS-35	W-E	2300	4300	profile just to S of Riniken borehole; 2500-3000 slight flexures above basement faults
B5-14	11-NS-37	W-E	2350 4050	2750 5650	profile just to N of Riniken borehole; 5650-6450 influence of Sigg. anticline; between 2750 and 4040, Tli (conceptual)

1 Anhang- Beilage	2 Linie	3 Orien- tierung	4 CMP start	5 CMP end	6 Bemerkungen
Nördlich Lägern - reprozeßierte Linien (NAB 13-10 Anhang)					
A-06	82-NS-70	W-E	2750	2950	through Weiach borehole (CMP 2870); large basement faults below; east and west of segment, Tli (conceptual)
A-10	82-NX-60	S-N	550	750	near Weiach borehole (CMP 880); undulations above multiple basement faults at 750900; disturbed relations immed. north of borehole
A-20	84-NS-71	W-E	0	150	through Weiach borehole (CMP 130);, rest of profile disturbed relations at Opa, Mk and bM levels
A-22	91-NO-58	S-N	?1100	?1250	between lines B5-08 and B509; good bOpa and bMk reflector, but unusually undulatory and between two regional tectonic zones (Sigg. and Stad.-Irch.) - questionably favourable (see B5-09); low priority for further exploration
A-23	91-NO-61	S-N	700	1050	oblique line; short favourable stretch etween 2 regional zones (Egli., Stad.-Irch.)
A-24	91-NO-62	S-N	750	1050	tectonically similar to A-23
A-30	91-NO-75	W-E	200	650	through Weiach borehole (CMP 540);

1 Anhang- Beilage	2 Linie	3 Orien- tierung	4 CMP start	5 CMP end	6 Bemerkungen
Nördlich Lägern - neue Linien 2011/12 (NAB 13-10 Beilage 5)					
B5-07	11-NS-14	S-N	--	--	within Standortgebiet, faulted-flexured along whole line - no favourable CMP range
B5-08	11-NS-16	S-N	--	--	within Standortgebiet, faulted-flexured along whole line - no favourable CMP range
B5-09	11-NS-18	S-N	?5100	?5900	poss. favourable target 5100-5900, but undulatory, could be flexured - tectonically similar to A-22, questionably favourable; low priority for further exploration
B5-10	11-N-20	S-N	3300	4300	large basement faults and disturbed Mesozoic formations on each side of this range
B5-12	11-NS-33	W-E	2500	7900	continuous reflectors TLi and BMk with small angle/long wavelength undulations, crossing lines B5-07-B5-09 (!! - exactly in structural strike?); two clear faults at 6400 and 6550 - lay-out det. faults?
B5-13	11-NS-35	W-E	?7600	?8050	parallel to B5-12, to the north; intersects crosslines B5-07 - B5-09 in faulted/flexured part of line, only 7600-8050 judge as favourable (cf. B5-12); large basement faults under whole line; questionably favourable, low priority for further exploration

5 Expertenbericht Prof. Dr. E. Kissling

**Bericht zum Review 2D-Seismik der Nagra in
Etappe 2 SGT**

Expertenbericht zuhanden des
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in Brugg.

Prof. Dr. Eduard Kissling

Dezember 2015

5.1 Fragestellung und Vorgehensweise

Dieser Bericht umfasst als Abschluss aus meiner persönlichen Sicht die wesentlichen Ergebnisse des Reviewprozesses 2013-2015 zur 2D-Seismik der Nagra, Etappe 2.

Welche Berichte sind in diesem Review einbezogen?

Zur Beurteilung stehen:

NAB 13-09: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NTB 14-02: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

In die Beurteilung mit einzubeziehen sind folgende zu Grunde liegende oder inhaltlich in Teilen damit verbundene Berichte:

NAB 10-39, Nagra (2011), Nagra (2012a), Nagra (2012b), Nagra (2012c), Nagra (2012d), NAB 13-40, NAB 14-17, NAB 14-57, NAB 14-58, NAB 14-74, NAB 14-88 (siehe Kapitel 1.4 oder 5.7).

Vorgehen beim Review

Der Review-Prozess während den vergangenen zwei Jahren verlief parallel mit dem Abschluss der Arbeiten der Nagra an den Berichten NAB 13-10, NAB 13-80 und NTB 14-34. An verschiedenen workshops informierte jeweils die Nagra vorab über den Stand der Arbeiten und stellte sich den technischen Fragen der Reviewers. Die Diskussionen an diesen Treffen mit der Nagra und mit Proseis haben in zweifacher Hinsicht geholfen. Einerseits ermöglichen sie uns (Reviewers) einen kritischen und vertieften Einblick in das Vorgehen der Nagra beim Erfassen, Aufarbeiten, Zeit- und Tiefeninterpretieren der 2D-Seismik, der allein aus den Berichten kaum zu erarbeiten wäre. Andererseits konnte die Nagra in ihren Berichten speziell auf einige der Diskussionspunkte klärend eingehen. Dies ist nicht auf schlecht geschriebene oder dargestellte Berichte, sondern primär auf den Umfang des Materials und auf das Fehlen einer Zusammenfassung des „Roten Fadens“ durch die Berichte zurückzuführen. Letzteres fehlt allerdings bis heute und dies stellt eine enorme Hürde für jeden aussenstehenden Experten dar zur Gesamtbeurteilung der Unterlagen 2D-Seismik und der von der Nagra daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen zur Struktur des Untergrundes in den Untersuchungsgebieten in der Nordschweiz. Aus meiner Sicht wäre ein seriöser Review nicht möglich gewesen ohne diese ausführlichen technischen Diskussionen. In einzelnen Punkten (z.B. Genauigkeitsabschätzungen) ergaben sich ausserdem wissenschaftliche Erkenntnisse, welche teilweise ihren Niederschlag in der Formulierung der entsprechenden Abschnitte der Berichte fand. Die Kritik und Fragen der Reviewers sowie die Antworten der Nagra sind in den entsprechenden Protokollen der Diskussionen enthalten. Auf die Wiederholung der entsprechenden Detail-Kritikpunkte, welchen in den Berichten Rechnung getragen wurde, kann deshalb in diesem Review verzichtet werden.

Die Fragestellungen für diesen Review der geologisch-tektonischen Interpretation der 2D-Seismik wurden vom ENSI wie folgt festgelegt (siehe Kapitel 1.3):

Frage 5.1: Sind die Interpretationen der Strukturen der seismischen Linien nachvollziehbar?

Frage 5.2: Wurde bei der seismischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Frage 5.3: Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen, von anordnungsbestimmenden Störungen und von konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen nachvollziehbar?

Frage 5.4: Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien vollständig?

Frage 5.5: Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandene Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Frage 5.6: Mit welcher Zuverlässigkeit kann aus der Seismik ein Rückschluss auf die laterale Kontinuität von Faziesbereichen im Braunen Dogger und in den Effinger Schichten gezogen werden?

5.2 Erarbeitung und seismische Interpretation der 2D-Seismik

In diesem Abschnitt soll generell auf die Berichte NAB13-09, NAB13-10, NAB 13-80 und NAB14-34 in Bezug auf die oben genannten Fragen 5.1 und 5.2 eingegangen werden.

Die Berichte NAB 10-39, Nagra (2011) und Nagra (2012a-d) dokumentieren viele wichtige einzelne Punkte im Ablauf der Aufbereitung der seismischen Profile und geben zusammen mit NAB 13-09 einen guten und vertieften Einblick in das Processing der 2D-Seismik 2011/12. Aus meiner Sicht kann das seismisch-technische Vorgehen bis und mit der Zeit-Interpretation (NAB 13-10) nicht nur als state-of-art bezeichnet werden, sondern es setzt auch neue Maßstäbe. Schon fast grundsätzlich werden jeweils die heute bekannten verschiedenen Möglichkeiten miteinbezogen und in Bezug auf ihre Ergebnisse verglichen. Ich bin überzeugt, dass bis zu diesem Punkt der seismischen Modellierung keine wesentlichen Verbesserungen (relevant für die Fragestellung der 2D-Seismik Etappe 2) möglich sind. Allerdings besteht mit Blick auf unsere Zielstrukturen auch weiterhin die grundsätzliche Problematik in der 2D-Seismik mit steil stehenden tektonischen Strukturen, indem diese meist nur indirekt im seismischen Bild der Schichthorizonte sichtbar und nicht direkt abbildbar sind (vgl. z.B. Abbildung 5-1).

Jedoch kann letztlich erst die kritische Analyse der strukturellen und tektonischen Interpretation der tiefen-migrierten seismischen Bilder (im Falle der vorliegenden Berichte müssen jeweils die TWT und die verschiedenen tiefen-migrierten seismischen Bilder gemeinsam berücksichtigt werden) sowie die direkte Bezugnahme auf die Zielsetzungen der 2D-Seismik Auskunft über Qualität und Sinn der gewählten Vorgehensweise und Prozessierungsschritte geben. Die Nagra hat sich bemüht, neben den Strukturen selbst soweit möglich auch Angaben zur Genauigkeit der hergeleiteten seismischen Strukturbilder zu machen. Während daraus für im Normalfall gut sichtbare und eindeutig identifizierbare Horizonte (vgl. z.B. Top Lias, Abbildung 5-1) sinnvolle qualitative (wo ist der Horizont gut abgebildet?) und quantitative (welcher Fehler in der absoluten Höhenlage betrifft gut abgebildete Bereiche?) Ungenauigkeitsangaben ableitbar sind, sind diese Fehleranalysen für schlecht abbildbare Horizonte (z.B. Top Opalinuston, Abbildung 5-1) und für Störungen (vgl. Punkt 4, Abbildung 5-1) nicht verwendbar.

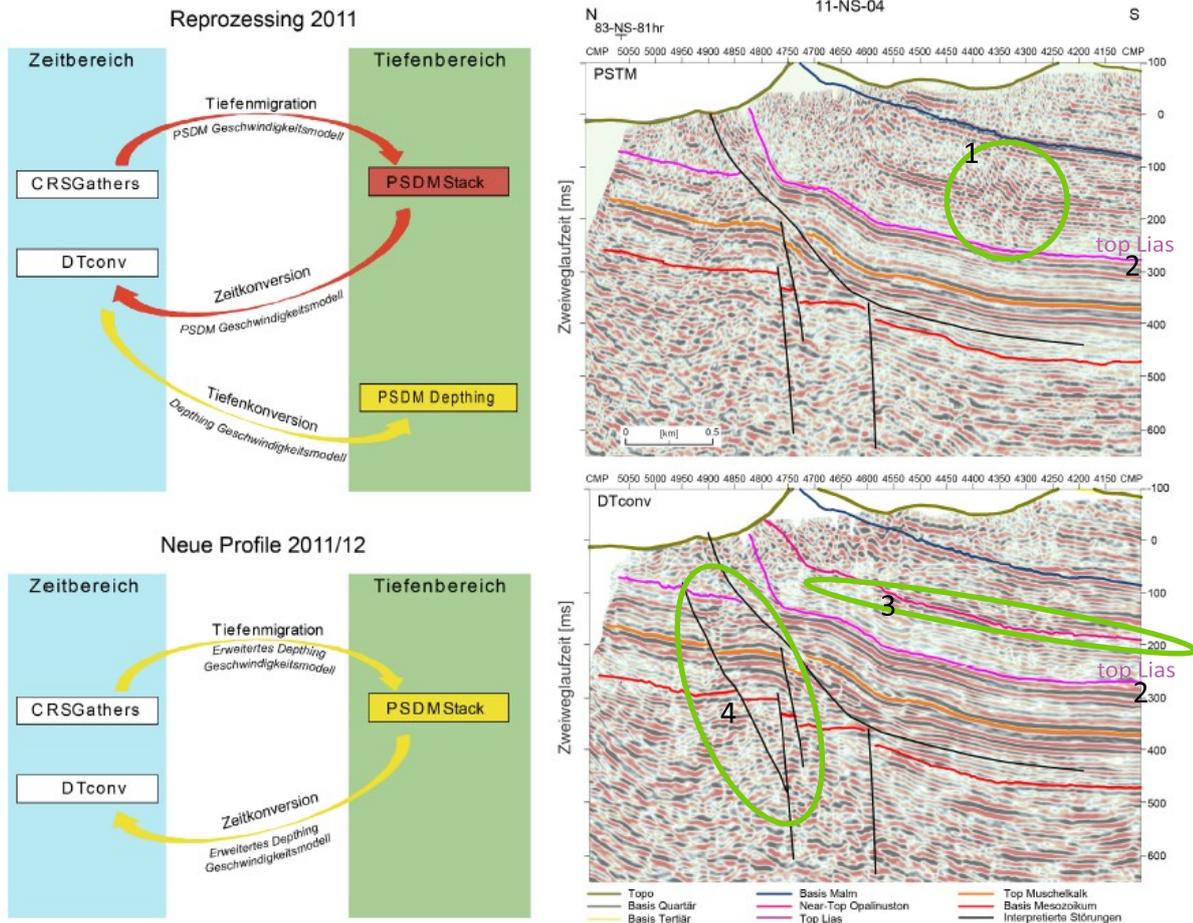


Abbildung 5-1: Schema (links, Fig. 2-2, NAB 14-34) und Beispiel Profil-Bild (rechts, Fig. 4-6, NAB 14-34) seismische Datenverarbeitung im Zeit- und Tiefenbereich. 1: Bereich mit seismischen Artefakten im Bild von PSTM welche bei DTconv nicht zu sehen sind. 2: Sehr gut abbildbarer und verfolgbarer seismischer Horizont der Top Lias (Unterfläche Opalinuston) entspricht. 3: Schlecht abbildbarer Horizont Top Opalinuston, im Bild PSTM nicht interpretierbar. 4: Signifikant unterschiedliche Interpretation von Störungen in PSTM und DTconv seismischen Bildern.

Zur Beurteilung der Eindeutigkeit und Genauigkeit der seismischen Interpretation kann der Vergleich der seismischen Bilder hergeleitet als PSDM Stack (Tiefenschnitt) oder DTconv (Zweiweglaufzeit-Bild) herangezogen werden. Dies hat die Nagra im Bericht NAB 14-34 an Beispielen ausführlich belegt (vgl. Abbildung 5-1). Die Umwandlung von Zweiweglaufzeit in Tiefenschnitte (vgl. NAB 13-80) erfolgt mit einem Geschwindigkeitsmodell. Dessen lokale Ungenauigkeiten (3D und Anisotropie) können zwar relativ gross sein, doch sind die daraus resultierenden Fehler in regionaler Tiefenlage (Masstab horizontal > 1 km und vertikal > 50 m) und Topographie der gut abbildbaren Horizonte durch den direkten Vergleich mit Bohrungen und über die Mistieskorrekturen an den Schnittpunkten der Profile gut kontrollierbar. Korrekterweise wurden jedoch die umfassenden Kontrollen der 2D-seismischen Bilder an den Kreuzungsstellen der Profile in der Zeitdimension gemacht. „Die nach der Tiefenkonvertierung verbleibenden Misfits/Misties sind gering (< 10-20 m) und liegen meist weit unterhalb der für die Markerhorizonte anzunehmenden totalen Tiefenungewissheiten“ (NAB 14-34, s.39). Dies dokumentiert überzeugend ein adäquates Vorgehen beim Prozessing und bei der seismischen Interpretation sowie eine hohe Verlässlichkeit der Strukturen und der Unsicherheitsangaben für die **gut abbildbaren Markerhorizonte**. Allerdings kann dies nicht für die oben angesprochenen schlecht abbildbaren Horizonte und für die lokalen

Störungszonen gelten. Bei letzteren spielt vor allem auch die Mehrdeutigkeit der seismischen und tektonischen Interpretation eine grosse Rolle und sie sind Thema von Kapitel 0 dieses Berichtes.

Ein schlecht –wenn nicht sogar sehr schlecht- seismisch abbildbarer Horizont (in jedem Fall mit 2D-Seismik, eventuell etwas besser mit 3D-Seismik?) ist der für die Zielsetzung der Nagra äusserst wichtige Top Opalinuston. Der Tiefen-Vergleich zwischen dem gut abbildbaren Top Lias und dem schlecht-bis-sehr-schlecht abbildbaren Top Opalinuston zur Bestimmung der Mächtigkeit des Opalinustons ist auf Grund der solchen Abschätzungen zugrunde liegenden Annahmen unzulässig und führt auch zu unsinnigen Werten. In diesem Sinne kann ich der im NAB 14-34 (Seite 39, letzter Abschnitt) angeführten Berechnung am Beispiel des Opalinuston nicht folgen und nicht zustimmen. In Übereinstimmung mit dieser meiner Einschätzung verwendet die Nagra im Anschluss zur Berechnung der Perimeter für die abzuklärenden Standorte ja auch eine als Durchschnitt aus den Bohrungen erhaltene konstante Mächtigkeit anstelle der lokal extrem stark variierenden Differenzen zwischen den möglichen Tiefenlagen von TopLias und TopOpalinuston. Die Inkonsistenz in der Ableitung und Anwendung von Ungewissheiten von Tiefenangaben von Horizonten zur Bestimmung von Mächtigkeiten (Kapitel 6, NAB 14-34) ist zu bedauern, lässt sie doch generelle Zweifel aufkommen an der Verlässlichkeit und Nützlichkeit von quantitativen und qualitativen Abschätzungen der Ungenauigkeiten einer seismischen Interpretation. Für die Zielsetzung der 2D-Seismik jedoch hat sie aus meiner Sicht keine grosse Bedeutung, da für die Schlussbeurteilung die Lage des gut abbildbaren TopLias und eine aus Bohrungen einigermaßen zuverlässig belegte Mächtigkeit des Opalinustons herangezogen wurde.

Frage 5.1: Sind die Interpretationen der Strukturen der seismischen Linien nachvollziehbar?

Frage 5.2: Wurde bei der seismischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Beide Fragen können aus meiner Sicht mit einem klaren JA beantwortet werden. Die Nagra hat sich bemüht in ihren umfassenden Berichten die grundsätzlichen Variationen in den seismischen Bildern und dementsprechend auch in deren Interpretationen zu analysieren, zu diskutieren und an gut ausgewählten Beispielen zu dokumentieren. Die Vielfalt und Anzahl der Profile verunmöglicht es allerdings, für alle Mehrdeutigkeiten der Modelle die jeweiligen Alternativen zu diskutieren oder darzustellen. In der Folge können aus meiner Sicht in einigen Profilen Details der Interpretation der Nagra durchaus Anlass zu Kritik geben. Von der grossräumigen Struktur und dem regionaltektonischen Bild bis hin zu den verlangten vergleichenden Struktur-Resultaten für die möglichen Standorte sind die Interpretationen der Nagra nachvollziehbar und aus meiner Sicht gut begründet. Der Limitation auch der besten 2D-Seismik bei der Abbildung von steilstehenden Störungssystemen hat die Nagra insofern Rechnung getragen, als sie den Grundsatz von konservativ breitgewählten Bereichen von Störungszonen konsistent auf alle Standorte angewendet hat.

Geologisch-tektonische Interpretation

Auf Grund der grundsätzlich verschiedenen Erfassungs- und Interpretations-Möglichkeiten durch die 2D-Seismik von „anordnungsbestimmenden Störungen“ gegenüber den „regionalen Störungszonen“ und den zu meidenden tektonischen Zonen sollte die Frage 5.3 aufgeteilt und die Fragen 5.4 und 5.5 separat diskutiert werden.

Frage 5.3A: Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen und von konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen nachvollziehbar?

Frage 5.3B: Sind Lokation und Verlauf von anordnungsbestimmenden Störungen nachvollziehbar?

Frage 5.4: Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien vollständig?

Frage 5.5: Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandene Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

Störungszonen und Störungen/Brüche sind im seismischen Bild der 2D-Seismik kaum je durch reflektierende Bänder sondern fast ausschliesslich durch den Versatz von Horizonten zu sehen. Falls an einer bestimmten Stelle mehrere gut abbildbare Horizonte vertikal versetzt werden, so ist die Störung mit Sicherheit zu sehen, wenn auch nicht immer alle wichtigen Eigenschaften eindeutig feststellbar sind.

Regionale Störungszonen im Untersuchungsgebiet enthalten neben der bekannten Hauptstörung immer auch eine Reihe von Verästelungen und bilden so ein Störungssystem oder in der Terminologie der Nagra eine „regionale Störungszone“. Die vollständige Kartierung dieser regionalen Störungszone war ein wichtiges Ziel der 2D-Seismik. Die exakte Ausdehnung und Ausbildung einer regionalen Störungszone ist mit der 2D-Seismik nicht immer eindeutig zu erfassen, weshalb die konzeptionelle Einführung von „ zu meidenden tektonischen Zonen“ im direkten Umfeld von regionalen Störungszonen grundsätzlich zu begrüßen ist. Im Zusammenhang mit dieser Definition ist es mit der 2D-Seismik Etappe 2 gelungen, ein verlässliches Bild der tektonischen Überprägung des gesamten Untersuchungsgebietes durch die Kartierung der regionalen Störungszonen zu erarbeiten (Fig. 2, aus NTB 14-02). In Verbindung mit dem erarbeiteten tektonischen Modell erachte ich es als sehr unwahrscheinlich, dass eine weitere solche Zone in einem der Standorte sowie in deren direkter Umgebung übersehen worden wäre. Ausserdem ist mit Blick auf die grundsätzliche Schwierigkeit in der Erfassung von lokalen Störungen die konservative Auslegung einer im Zweifelsfalle eher breiter zu wählenden Zone für eine bekannte regionale Störungszone im Grundsatz sinnvoll und führt meist zu verlässlicheren Abschätzungen der Gebietsbegrenzung, wie zum Beispiel für den Standort Jura Ost in NTB 14-02 dargelegt (Abbildung 5-2). Die Frage 5.4 **nach der Vollständigkeit** ist in diesem Sinne für die **regionalen Störungszonen** eindeutig mit **JA** zu beantworten.

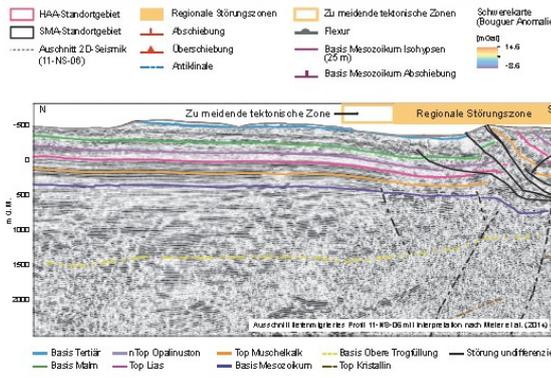
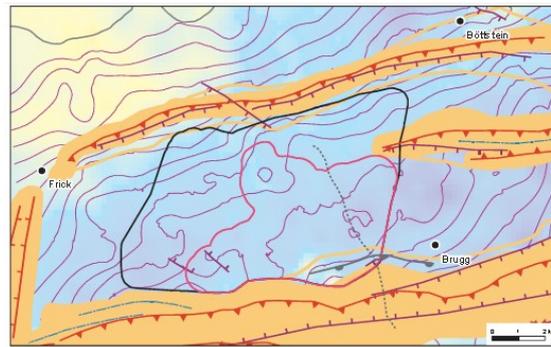
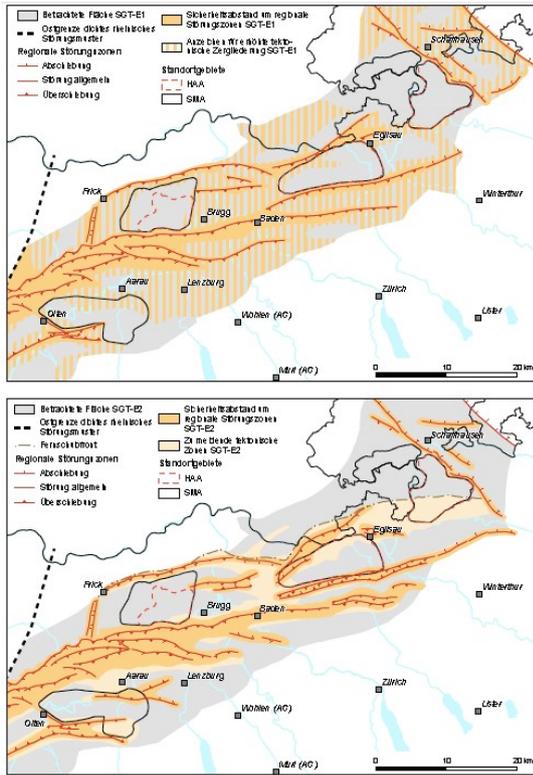


Fig. 4.4-6: Illustration der zu meidenden tektonischen Zonen im Süden des geologischen Standortgebiets Jura Ost anhand von Schwere- und 2D-Seismikdaten.

Abbildung 5-2: Abgrenzung der regionalen Störungszone, aus Etappe 1 (links oben) und nach Etappe 2 (links unten) unter Einbezug der „konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen (kmtZ)“ (entspricht Fig. 4.4-1, NTB 14-02) und Beispiel zur Definition von regionaler Störungszone und kmtZ als „gebietsbegrenzende geologische Elemente“ für den Standort Jura Ost (rechts).

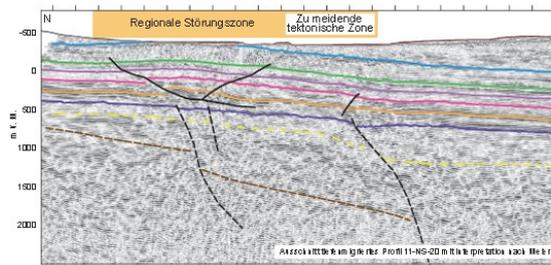
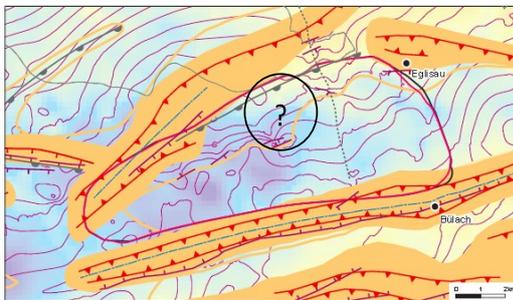
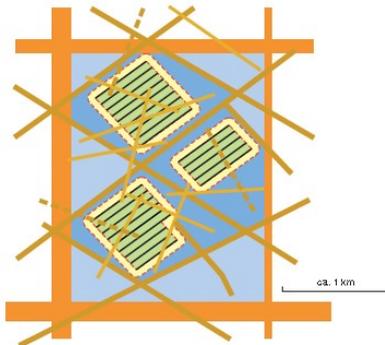


Abbildung 5-3: Abgrenzung Lagerperimeter N Lägern (entspricht Fig. 4.4-5, NTB 14-02) basiert auf breiter zu meidende tektonische Zone im Norden (vgl. Gebiet im Kreis).

Allerdings ist die Zuordnung von einzelnen oder mehreren kleineren Störungen – sichtbar auf verschiedenen seismischen Profilen- zu einer regionalen Störungszone nicht immer eindeutig und können sich daraus wichtige Konsequenzen für den Lagerperimeter ergeben. Dies ist für das Standortgebiet N-Lägern der Fall (siehe NTB 14-01, Fig.4.2-14). In Abbildung 5-3 lässt sich unschwer erkennen, dass zwei Abschiebungen im Horizont Basis Mesozoikum (siehe Kreis mit Fragezeichen) in der jetzigen Interpretation der Nagra die zu meidende tektonische Zone von der regionalen Störungszone im Norden bis weit nach Süden in das Standort-Gebiet hineinreichen lassen. In diesem speziellen Fall verringert sich der Lagerperimeter dadurch stark, was nicht der Fall wäre, wenn diese Störungen als „anordnungsbestimmende Störungen“ interpretiert worden

wären. In diesem speziellen Sinne würde ich die **Frage 5.5** mindestens in Teilen für den Standort N-Lägern mit **Nein** beantworten.



Signatur	Beschreibung	Bedeutung
	gebietsbegrenzende geologische Elemente	gebietsbegrenzend
	anordnungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Anordnung der Lagerkammern
	einlagerungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Einlagerung innerhalb Lagerkammern
	kleinere geologische Elemente	in Sicherheitsanalyse berücksichtigt
	Lagerkammern	-
	Lagerkammerbereich	-
	Lagerfeld	-
	nutzbare Lagerzone	-
	nicht nutzbare Lagerzone	-

Geologisches Standortgebiet	Platzbedarf [km ²]
SMA	
Südranden (SR)	3 – 4
Zürich Nordost (ZNO)	ca. 3
Nördlich Lägern (NL)	4 – 5
Jura Ost (JO)	3 – 4
Jura-Südfuss (JS)	6 – 8
Wellenberg (WLB)	ca. 3
HAA	
Zürich Nordost (ZNO)	ca. 6
Nördlich Lägern (NL)	8 – 12
Jura Ost (JO)	6 – 9

Abbildung 5-4: Prinzip der Verwendung von Strukturelementen zur Abschätzung des Platzbedarfs (links). Gebietsbegrenzende Elemente sind „Regionale Störungszonen“ sowie „konzeptionell zu meidende tektonische Zonen“. Ergebnisse der Abschätzung des erforderlichen Platzbedarfs für ein SMA- und ein HAA-Lager in den Lagerperimeter der verschiedenen geologischen Standortgebiete (rechts) basierend auf den Angaben aus der 2D-Seismik zu den „anordnungsbestimmenden Störungen“.

Das Konzept von gebietsbegrenzenden und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen der Nagra (vgl. Abbildung 5-4, rechts) erachte ich grundsätzlich als sinnvoll. Allerdings muss man sich der Schwierigkeiten bewusst sein, solche anordnungsbestimmenden Störungen zu erfassen und in ihrer Bedeutung zu bewerten. Das oben genannte Beispiel von zwei lokalen Störungen im Untersuchungsgebiet N-Lägern, wobei deren Existenz gesichert deren Relation zur regionalen Störungszone aber eigentlich unbekannt ist, verdeutlicht die Herausforderung in der Bewertung. Grundsätzlich ist aber festzuhalten, dass mit der 2D-Seismik keine für die vergleichende Bewertung von Standorten sinnvolle Kartierung von „anordnungsbestimmenden Störungen“ möglich ist, denn die Erfassung von solchen Störungen ist eher zufällig statt systematisch für das Gebiet. **Von Vollständigkeit (Frage 5.4) kann keine Rede sein.** Die **Frage 5.3B** kann jedoch mit **JA** beantwortet werden, wenn man sie so versteht ob die von der Nagra gefundenen und dargestellten „anordnungsbestimmenden Störungen“ auch als solche Strukturen „nachvollziehbar“ sind. Auf Grund der bestehenden seismischen (gravimetrische Studien helfen in diesem Zusammenhang wegen der Vieldeutigkeit der Aussagen auch nicht weiter) Datenbasis, würde ich in den meisten Fällen zu ähnlichen Resultaten kommen.

Tab. 4-3: Intersection statistics for non-regional local-scale faults (correlated and uncorrelated) in the Top Lias marker horizon in the area of northern Switzerland (see Enclosure 3-1).

Seismic Lines	Length	Lines	Correlated fault intersects	Individual correlated fault intersects	Uncorrelated structural intersects	Total non-regional intersects	Mean spacing [km]
Total	1'693 km	88	75	73	171	246	6.9

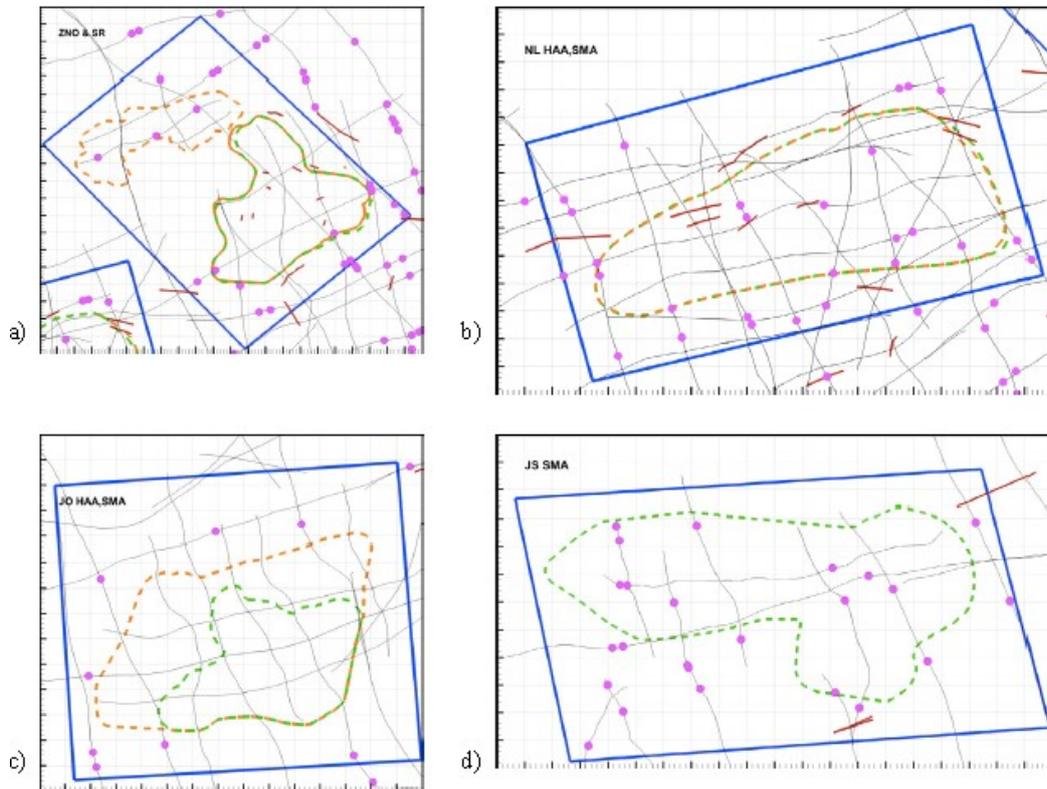


Fig. 4-12: Siting regions, local scale correlated fault traces and uncorrelated fault picks: a) Südranden (SR)/Zürich Nordost (ZNO), b) Nördlich Lägern (NL), c) Jura Ost (JO), d) Jura-Südfuss (JS).

Siting regions and LDF counting boxes are marked by stippled green and solid blue lines respectively. Local scale correlated fault traces are given in red, uncorrelated fault picks as pink dots. Grid spacing 1 km.

Abbildung 5-5: Für eine statistische Auswertung und einen relevanten Vergleich unter den Standorten reicht die Datenbasis von „anordnungsbestimmenden Störungen“ nicht aus (Fig. 4-12 und Tab. 4-3 aus NAB 14-88).

Die Bedeutung der in der 2D-Seismik gefundenen „anordnungsbestimmenden Störungen“ liegt (1) in ihrer –allerdings schwierig zu beurteilenden- Relation zu den „Regionalen Störungszonen“ und den „konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen“ und (2) in der Definition von Untersuchungszielen für die 3D-Seismik. Aus meiner Sicht ist der aus der Interpretation der 2D-Seismik Etappe 2 erhaltene Datensatz an „anordnungsbestimmenden Störungen“ in hohem Masse inkonsistent und inkomplett und selbst für statistische Aussagen (NAB 14-88) von sehr zweifelhaftem Nutzen (Abbildung 5-5), da eine Angabe über die Unsicherheit der Aussagen bezüglich der Dichte und Lage von „anordnungsbestimmenden Störungen“ nicht möglich ist. In der Konsequenz sind auch die Angaben zum Platzbedarf der verschiedenen Standorte zusammengefasst in der Tab. 4-1 NAB 14-99 (vgl. Abbildung 5-4, rechts) wie im Bericht vermerkt nur als „*grobe Anhaltspunkte*“

(NAB 14-99, S. 43) zu verstehen und dienen zum „visualisieren wie ein durch anordnungsbestimmende geologische Elemente zergliederter Lagerperimeter genutzt werden kann“ (NAB 14-99, S. 43). Mit anderen Worten, die von der Stossrichtung her sehr interessanten NAB 14-88 und NAB 14-99 sind für den qualitativen Vergleich unter den Standorten erst dann zu verwenden, nachdem mit einer 3D-Seismik die entsprechenden „anordnungsbestimmenden Störungen“ konsistent und vergleichsweise komplett erfasst worden sind.

5.3 Aussagekraft der Strukturinformation zur Bewertung der Standortgebiete bezüglich „Platzangebot“

Im Protokoll zur Besprechung vom 11. März 2015 (Kapitel 1.2) definiert die Nagra das Vorgehen zur Bestimmung des Platzangebotes in den verschiedenen zur Diskussion stehenden möglichen Standortgebieten wie folgt:

„Das Platzangebot wird auf Basis verschiedener Faktoren hergeleitet, welche in den Berichten NTB 14-02 Dossier II, NAB 14-88 und NAB 14-99 dokumentiert sind. Die Informationen aus NTB 14-02 (relevante Angaben zur Mächtigkeit, minimalen und maximalen Tiefenlage, zu regionalen Störungszonen sowie tektonisch zu meidenden Zonen) und NAB 14-88 (Standortgebiets-spezifische Charakterisierung der tektonischen Zergliederung als Beitrag zur Bestimmung des Platzangebotes innerhalb der Lagerperimeter) liefern die Basis zur Bestimmung des Platzangebotes, welches kombiniert mit der Definition des minimalen Platzbedarf (NAB 14-99) die Bewertung des Indikators „Platzangebot“ für jedes individuelle Standortgebiet in NTB 14-01 festlegt.“

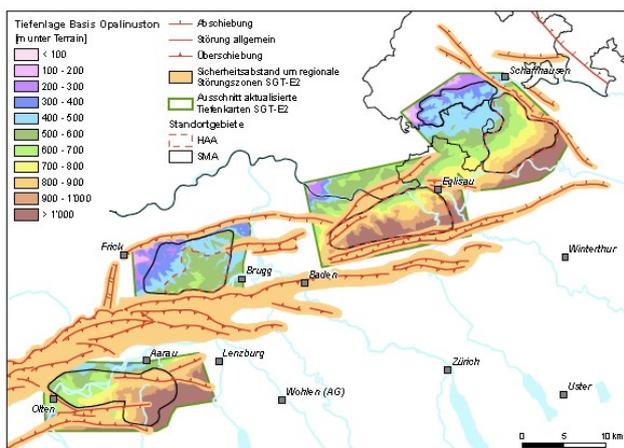


Fig. 5.3-3: Aktuelle Schichtmodelle der Basis Opalinuston (Top Lias): Tiefenlage m unter Terrain.

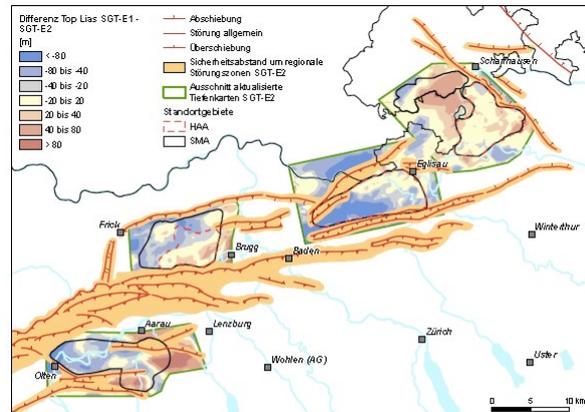


Fig. 5.3-4: Differenz zwischen den Schichtmodellen der Basis Opalinuston (Top Lias) aus SGT Etappe 1 und SGT Etappe 2.

Negative Werte (Rottöne) bedeuten, dass das neue Schichtmodell tiefer ist als das Modell aus SGT Etappe 1, bei positiven Werten (Blautöne) ist das neue Schichtmodell flacher.

Abbildung 5-6: Figuren 5.3-3 und 5.3-4 aus NTB 14-02 zeigen die Tiefenlage von Top Lias unter Terrain (links) und als Mass für die vertikale Genauigkeit die Differenz in der Tiefenlage zwischen Resultate von Etappe 1 und Etappe 2 (rechts). Gut sichtbar ist das Gebiet mit geringsten Veränderungen im Standortgebiet ZH-Nordost, welches bereits früher mit 3D-Seismik erfasst wurde. Die Karte rechts lässt allerdings keine quantitativen Rückschlüsse auf die Tiefengenaugigkeit der Karte links zu, sondern dokumentiert die Qualität der 2D-Seismik Etappe 2 und die Möglichkeiten der 3DSeismik. Auf der Karte links ist gut zu sehen, dass die beiden grössten Gebiete mit Opalinuston im geeigneten Tiefenbereich in den Standorten Jura-Ost und ZH-Nordost liegen.

Gemäss den in Kapitel 0 zusammengefassten Kommentaren können für die vergleichende Standort-Betrachtung (Platzangebot) die Tiefenlage des gut abbildbaren Horizontes TopLias sowie die gebietsbegrenzenden geologischen Elemente (Regionale Störungszonen und zu mei-

dende tektonische Zonen) herangezogen werden (Abbildung 5-6). Anordnungsbestimmende Störungen sind demmassen fragwürdig (ausser für das Gebiet ZH Nord dank bestehender 3D-Seismik), dass sie nicht verwendet werden sollten zur vergleichenden Beurteilung der Standorte.

Auf Grund der schlechten seismischen Abbildbarkeit des Horizontes TopOpalinuston kann die Mächtigkeit des Opalinuston nicht direkt aus der 2D-Seismik hergeleitet werden. Der Berechnungen der Nagra liegt deshalb die Annahme einer durchschnittlichen konstanten Mächtigkeit des Opalinuston zu Grunde, welche aus den Bohrungen bestimmt wurde. Dies ist zwar nicht optimal, darf jedoch als der Situation am besten gerecht werdende Annahme bezeichnet werden. Legt man für die vergleichende Studie über die Lagerperimeter der verschiedenen Standortgebiete die oben genannten Bedingungen an, so wird allein aus der Karte der Topographie und Tiefe unter Terrain von TopLias (Abbildung 5-6, links) klar, dass J-O und ZH-NO eindeutig die grössten Bereiche für ein Lager aufweisen. Dies allerdings ohne eine wirklich verlässliche Abschätzung über die anordnungsbestimmenden Störungen machen zu können.

5.4 Laterale Kontinuität von Faziesbereichen im Braunen Dogger und in den Effinger Schichten

Frage 5.6: Mit welcher Zuverlässigkeit kann aus der Seismik ein Rückschluss auf die laterale Kontinuität von Faziesbereichen im Braunen Dogger und in den Effinger Schichten gezogen werden?

Die Erkennung der lateralen Kontinuität oder Diskontinuität von Faziesbereichen hängt grundsätzlich von der maximalen vertikalen Auflösung sowie von der sichtbaren Ausprägung und Stärke der geologischen Faziesbereiche im seismischen Bild, mit anderen Worten der Signifikanz der verschiedenen seismischen Faziesbereiche ab. Hilfreich bei der Identifikation von lateralen Variationen in der Fazies von Schichten ist das Vorhandensein von seismisch gut erkennbaren Horizonten innerhalb der Schicht im Vergleich mit deren oberen oder unteren Grenzfläche. Generell ist zu beachten, dass verschiedene geologische Faziesbereiche im seismischen Abbild in aller Regel im Vergleich zu guten Schichtgrenzen kaum zu quantifizierende Unterschiede hervorrufen und deshalb von Ausnahmen abgesehen nur in 3D-Seismik gut erfassbar und interpretierbar sind.

5.4.1 Effingerschichten (NAB 14-57)

Die vertikale Auflösungsmitte im Bereich der Effingerschichten aus der 2D-Seismik beträgt im optimalen Fall 18m (NAB 14-57, S. 8). Interne Strukturen der Effingerschichten sind auch in den Bohrungen (Logabfolgen und Logtrends, vgl. Fig. 3, NAB 14-57) nur schwer zu erkennen und kaum zu korrelieren. Die Kalibration der Seismik mit den in Zeit konvertierten Logs der Bohrungen ist nur ansatzweise möglich, so dass „*ein Horizont mindestens in der Nähe des stratigraphischen Tops der Effinger Schichten versuchsweise kartiert werden kann*“ (NAB 14-57, S. 19). Weiter sind die beiden seismischen Horizonte BTe und nTEff „nicht auf Charakter kartierbar, sondern ungefähr parallel zu darunter liegenden Reflexionspaketen und dem BMa-Horizont kartiert, doch kann dieser auch hier nicht durchgehend auf Reflexionscharakter kartiert werden“ (NAB 14-57, S.21). Einzig der Horizont NearTop Gerstenhübel-Schichten kann meist gut verfolgt werden. Allerdings ist auch damit bisher nur eine Qualitätsklassifizierung der Sichtbarkeit des Horizontes (Fig. 11, NAB 14-57) möglich, von einer eigentlichen Kartierung der Faziesbereiche kann keine Rede sein.

Fazit für Effinger Schichten: Aus meiner Sicht nicht unerwarteterweise (Limiten von 2D-Seismik) können keine Faziesbereiche kartiert werden. Weiter fehlt jegliche Auflösung von allfällig vorhandenen internen Bruch-Strukturen und die Angaben zur lateral variierenden Mächtigkeit der Effinger Schichten sind im besten Fall qualitativ zu verstehen. Für die gestellte Aufgabe ist eine 3D Seismik unerlässlich.

5.4.2 „Brauner Dogger“ (NAB 14-58)

Die vertikale Auflösungsmitte im Bereich des Braunen Dogger aus der 2D-Seismik beträgt im optimalen Fall 17m (NAB 14-58, S. 11). Der Vergleich von Soniclogs mit den seismischen Linien erlaubt für mindestens 4 Bohrungen die Definition von seismischen Faziesseinheiten (Figuren 6-9, NAB 14-58), welche sich auf einigen seismischen Linien verfolgen lassen und so eine grobe Kartierung erlauben (Figuren 15 und 16, NAB 14-58). Allerdings ist in letzteren Figuren unschwer zu erkennen, dass die Auflösungsmöglichkeiten und die Sicherheit der Aussage im Standortgebiet Zürich Nordost dank der 3D Seismik um die Bohrung Benken entscheidend besser sind als für alle anderen Gebiete. Positiv wirkt sich auch aus, dass die Reflektivität der Schichtung innerhalb des Braunen Doggers höher ist als in den Effinger Schichten. Aus meiner Sicht sind jedoch zuverlässige Aussagen über die Faziesbereiche auch im Braunen Dogger nur mit 3D Seismik möglich. Im Rahmen der vorsichtigen Ausdruckweise der Autoren von NAB 14-58 im Kapitel 5 (z.B. „*die versuchsweise kartierten Faziesgrenzen ...*“, S. 47) kann ich den Schlussfolgerungen insgesamt zustimmen. Es gilt jedoch festzuhalten, dass mit der Fragestellung der „zuverlässigen Kartierung von Faziesbereichen“ einerseits die Limitierung der 2D-Seismik überschritten während andererseits die Möglichkeiten der 3D Seismik sicher nicht vollständig ausgeschöpft werden.

5.5 Schlussbemerkungen

Auch wenn einige (Teil-)Antworten zu den gestellten Fragen kritisch ausfallen, so ist mein Gesamteindruck zu Ablauf, Resultaten, Begründungen zu Schlussfolgerungen und wissenschaftlich objektive Darstellung der 2D-Seismik Nagra Etappe 2 sehr positiv. Die Limitierung liegt in der Natur der 2D-Seismik und nicht in der Herleitung der Resultate. Verlangt man positive Antworten zu allen gestellten Fragen so ist eine flächendeckende 3D-Seismik und sind damit verbunden weitere Bohrungen nötig.

Meiner Ansicht nach wäre es der Verständlichkeit des Schlussberichtes von Etappe 2 auch für Experten sehr zuträglich und würde es die Glaubwürdigkeit der darin enthaltenen Schlüsse aus der seismischen Interpretation verstärken, wenn die wichtigsten Schritte des gesamten Ablaufs des Prozessing und der seismischen Interpretation in einer Flow Chart auf einer Seite zusammengefasst wären. Zu jedem Schritt könnte dabei auf den oder die entsprechenden Nagra-Berichte verwiesen werden, jedoch ohne weitere Begründungen. In analoger Weise wäre es hilfreich, wenn die auf verschiedene NAB und NTB verteilten einzelnen Resultate, welche zu den Schlussfolgerungen im NTB 14-02 führen im Detail benannt und in eine logische Argumentations-Reihenfolge gebracht würden.

5.6 Antworten zu den „ergänzenden Fragen“ (Kapitel 1.3)

Frage 6: Zu meidende tektonische Zone Standortgebiet Nördlich-Lägern

Für das Standortgebiet Nördlich Lägern (NL) spielt die ausgeschiedene zu meidende tektonische Zone (zmtZ) im nördlichen Bereich eine entscheidende Rolle für die Bestimmung des Platzangebotes. Die Nagra begründet ihre Ausscheidung (Figur 4.45 NTB 14-02 Dossier II, siehe Abbildung 5-7) mit der Definition der zmtZ entlang dem seismischen Profil 11-NS-20 (Figur 4.4-5 NTB 14-02 Dossier II, siehe Abbildung 5-8), mit der Lage über den nördlichen Randzonen des Permokarbondtroges (Figur 4.3-7 NTB 14-02 Dossier II, siehe Abbildung 5-9) und gravimetrischen Modellrechnungen dazu sowie Flexur-Interpretationen der Attributanalyse der 3D-Seismik, und mit Neigungskarten des Top Lias.

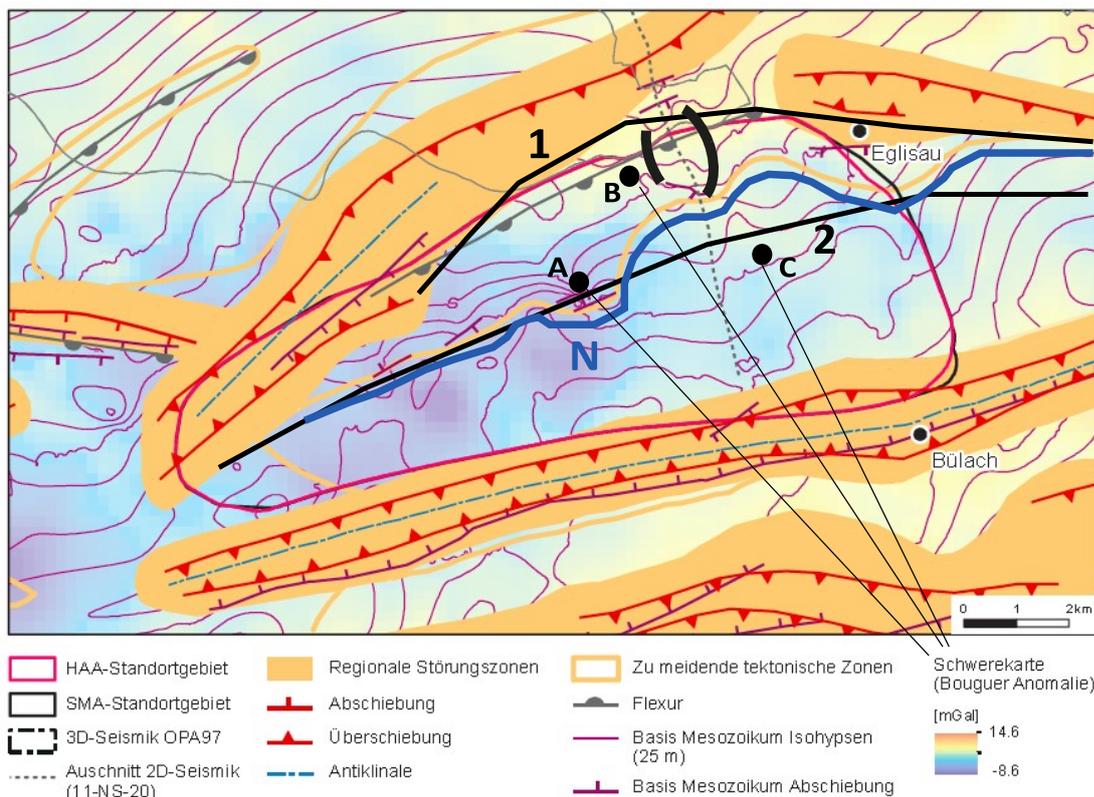


Abbildung 5-7: Entspricht Figur 4.4-5 (obere Figur) aus NTB 14-02 Dossier II, ergänzt mit folgenden Punkten. Durchgezogene schwarze Linien 1 und 2 zeigen zwei aus meiner Sicht auf den bestehenden Daten gleich wahrscheinliche südliche Begrenzungen der zmtZ. Demgegenüber ist die von der Nagra vorgeschlagene Begrenzungslinie (original in beige, zur besseren Sichtbarkeit hier in blau und mit N bezeichnet parallel verschoben wiederholt) aus meiner Sicht viel zu kleinräumig variierend aus den bestehenden geophysikalischen Daten nicht belegbar. Die Bougueranomalien sind im Original in blau bis beige Farben angegeben. Drei fast beliebig gewählte Punkt A, B, C zeigen die Schwierigkeit, respektive in diesem Falle die Unmöglichkeit der eindeutigen Herleitung der Lage der Randzone des PC – Troges. Die gestrichelt umrandete Fläche zeigt den Abschnitt entlang der seismischen Linie 11-NS-20, der in Figur 2 diskutiert wird.

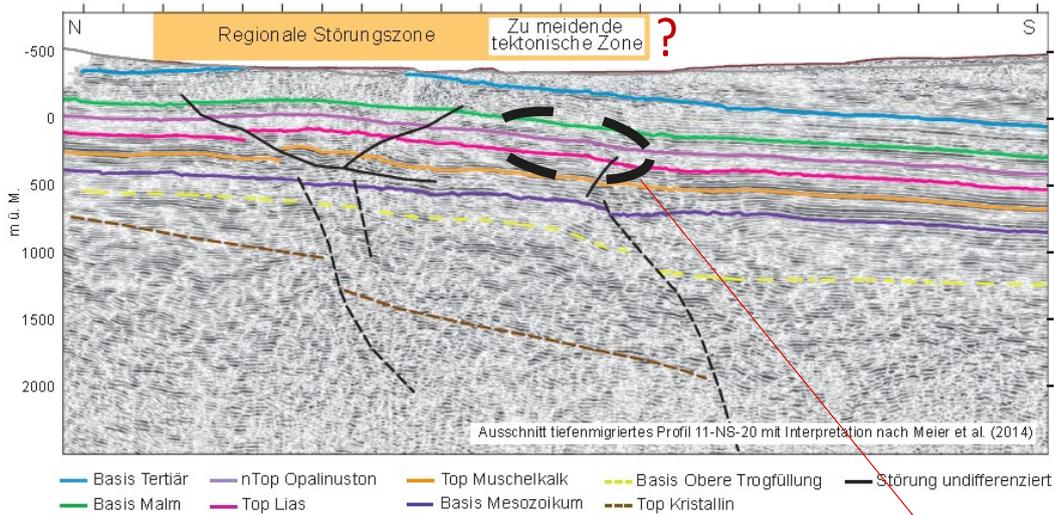


Fig. 4.4-5: Illustration der zu meidenden tektonischen Zonen im Norden des geologischen Standortgebiets Nördlich Lägern anhand von Schwere[?] und 2D-Seismikdaten[?]

Siehe auch Diskussion in Kap. 4.5.3.

Abbildung 5-8: Entspricht Figur 4.4-5 (untere Figur) aus NTB 14-02 Dossier II, ergänzt mit folgenden Punkten. Schwarz gestrichelt umrandetes Gebiet enthält jenes Schichtvolumen, welches von der Nagra als zmtZ ausgeschieden wird, auf Grund dieser seismischen Daten und von Schweredaten (vgl. originaler Figurentext). Aus meinem Verständnis der Datenlage im Vergleich mit der Interpretation der Nagra entlang den anderen 2D-seismischen Profilen ist diese Interpretation nicht gerechtfertigt. Die Schweredaten können von der Theorie der gravimetrischen Interpretation her (Vielfdeutigkeit) zu dieser Diskussion nichts beitragen.

Die Erfassung und Kartierung des Permokarbon-Troges im granitischen basement der Nordschweiz ist eines der herausragenden Ergebnisse der strukturellen Untersuchungen der Nagra mit grosser Bedeutung über die Abklärung der Standortgebiete hinaus. Bei allem persönlichen Respekt und Freude über die wissenschaftlich guten und wichtigen Ergebnisse muss man sich jedoch über die Aussagekraft dieser Karte im Klaren sein. Die Sicherheit der zusammengestellten seismischen Angaben variiert sehr stark. Die direkte Zuordnung einer Schwereanomalie zu Permokarbon-Mächtigkeit, Trog-Ausdehnung und deren lateralen Änderungen ist bisher nicht gelungen.

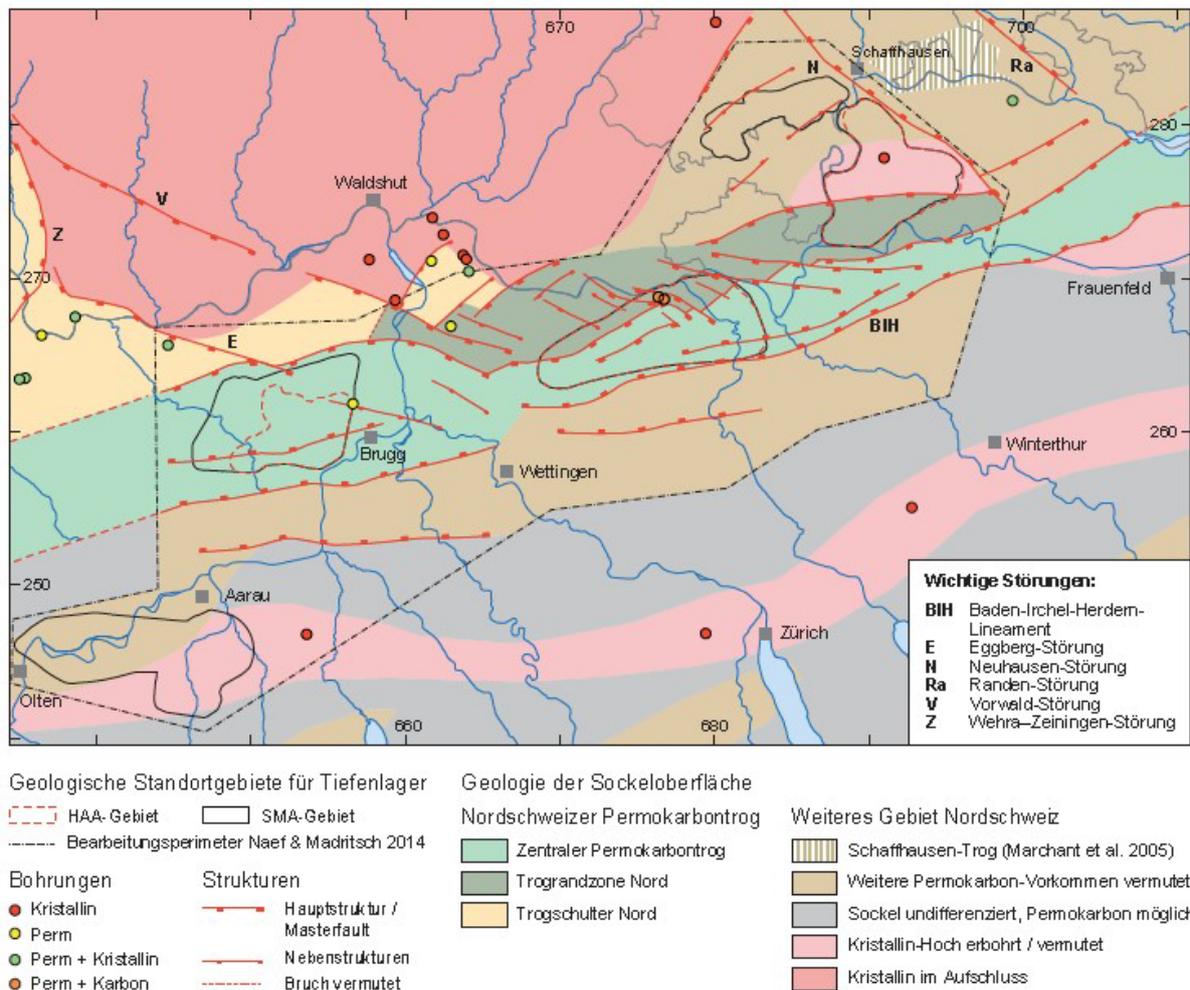


Abbildung 5-9: Synoptische tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbondtrog auf Niveau Top Kristallin aus NTB 14-02 Dossier II (Figur 4.3-7).

Dass ein PC-Modell eine mit der residualen Bouguer-Schwere regional vergleichbare Schwereanomalie liefert, lässt wegen der Vieldeutigkeit der gravimetrischen Berechnungen (Residualanomalie wie auch Schwerewirkung von Modellstrukturen) keine Rückschlüsse zu über die Richtigkeit des PC-Modelles. Für strukturelle Voraussagen mit einer Wellenlänge wie von der Nagra für die Begrenzung des zmtZ vorgeschlagen (siehe Abbildung 5-7, blaue Linie N), sind sie gänzlich ungeeignet. Auf Grund meiner Erfahrungen mit gravimetrischen Modellen würde ich sowohl eine Linie 1 wie eine Linie 2 (siehe Abbildung 5-7, schwarze Linien) als im Einklang mit den heutigen Kenntnissen über die nördliche Randzone des PC-Trog bezeichnen.

Die bisher einzige gezeigte seismische Linie 11-NS-20 (Abbildung 5-8) zeigt aus meiner Sicht im Vergleich zu anderen Abschnitten auf dieser und anderen seismischen Linien keine direkten Hinweise auf eine zmtZ. Neigungskarten des Horizontes Top Lias im Standortgebiet NL müssten sich nach meiner Kenntnis vollständig auf die Daten aus der 2D-Seismik beziehen. Ein quantitativer Vergleich zwischen einer Neigungskarte aus der 3D-Seismik des Standortgebietes Zürich-Nord und aus der 2D-Seismik von NL ist theoretisch nicht möglich und selbst ein qualitativer Vergleich erachte ich als höchst spekulativ. Die Fortsetzung der Lage und Richtung der Rafz-Marthalen-Flexur in Gebiet des Standortgebietes NL erachte ich gleichfalls als spekulativ.

Aus meiner Sicht ergibt sich folgende Situation:

Die Nagra hat eine 2D-Seismik hoher Qualität für alle Standortgebiete durchgeführt und deren Interpretation bildet die Basis für die Abklärungen der jeweiligen Platzangebote. Wie bereits im vorstehenden Bericht diskutiert und begründet sind auch der besten 2D-Seismik Grenzen der Abbildbarkeit und damit der Erfassung und Modell-Zuverlässigkeit gesetzt. Die zuverlässige und konsistente Bestimmung und Kartierung der geographischen Grenzen von zmtZ ist aus meiner Sicht eindeutig jenseits der Möglichkeiten der 2D-Seismik. Dies ist auch durch die Argumentationskette der Nagra belegt, welche ja mit Informationen aus der (früher gemessenen) 3D-Seismik vom Standortgebiet Zürich-N argumentiert. Die von der Nagra in Abbildung 5-7 dargestellte südliche Begrenzung der zmtZ zeigt eine lokale Variation in Lage und Richtung (Wellenlängen von z.T. einiges weniger als 1 km), welche sich aus keinem der genannten Datensätze so herleiten lässt. Vielmehr wird durch Vergleich mit der Lage der drei auf seismischen Linien interpretierten lokalen Störungen (siehe Abbildung 5-7) klar, dass man sich davon leiten liess und dazwischen irgendwie interpolierte.

Hätten wir keine 2D-Seismik vorliegen jedoch dieselben Kenntnisse über die Geologie und Tektonik wie heute, so würde ich auf die Frage nach einer wahrscheinlichen südlichen Begrenzung der zmtZ als Begrenzung des Aufnahmegebietes für 3D-Seismik entweder die Linie 1 (optimistische Variante) oder die Linie 2 (pessimistische Variante) bezeichnen. Auf Grund der vorliegenden seismischen Datenbasis und auf Grund der gegebenen Rahmenbedingungen für die Berechnung der Platzangebote sowie die Entscheidung für die zwei besten Standortgebiete (Konsistenz in der Berechnung und Argumentation) kann ich jedoch der spekulativen Interpretation der Nagra im Fall der zmtZ in NL schlicht nicht folgen. Aus wissenschaftlicher Sicht empfinde ich das Vorgehen und die Argumentation der Nagra in diesem speziellen Fall vom Ansatz her und im Ergebnis als falsch und unnötig.

Frage 7: Differenzierung bzgl. Tektonischer Zergliederung bei der Abschätzung des Platzbedarfs

Im NAB 14-99 legt die Nagra im Einzelnen dar, wie die Berechnung des Platzbedarfs innerhalb der Lagerperimeter der geologischen Standortgebiete durchgeführt wurde. Der NAB 14-99 war zwar für die Beurteilung nicht vorgesehen, doch erlaube ich mir nach dessen Studium trotzdem die Bemerkung, dass ich die Vorgehensweise bei der Berechnung des Platzbedarfs gut erklärt finde und dass sie mir gut und plausibel erscheint. Insbesondere ist es grundsätzlich auch „*nachvollziehbar und gerechtfertigt, eine unterschiedliche Anzahl an anordnungsbestimmenden Störungen in den Lagerperimeter der Standortgebiete anzunehmen*“ (Zitat aus Frage von ENSI an Experten). Dies aus theoretischen Überlegungen, dass es unwahrscheinlich ist, dass in allen Standortgebieten bis auf die kleinste lokale Ebene dieselben tektonischen Verhältnisse vorzufinden sind.

Leider sind jedoch die aus der 2D-Seismik vorliegenden Ergebnisse auch im besten Falle keineswegs genügend, um auch nur eine annähernd zuverlässige qualitative Abschätzung zu machen, wie dies in Tab. 3.1-1 im NAB 14-99 (siehe unten) enthalten ist.

Tab. 3.1-1: Grobcharakterisierung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager anhand standortbezogener Parameter mit Auswirkung auf den Platzbedarf.

Relative Beurteilung des Parameters im Vergleich zwischen den Standortgebieten mit dem Ziel eines geringen Platzbedarfs:

0: mittlerer Wert

+: signifikant günstiger als mittlerer Wert

-: signifikant ungünstiger als mittlerer Wert.

		Standortgebiete SMA					
		SR	ZNO	NL	JO	JS	WLB
		Lagerperimeter					
Nr.	Parameter	<i>mLE-r</i>	<i>mLE-r</i>	<i>mLE-u</i>	<i>mLE-r</i>	<i>mLE-r</i>	<i>mLE-r</i>
A	Abmessung Lagerperimeter	-	0	0	+	+	-
B	Anzahl anordnungsbestimmende geologische Elemente	+	+	-	0	-	0
C	Tektonische Überprägung	+	+	-	-	-	-
D	Tiefe	+	+	-	+	0	0
E	Mächtigkeit	-	+	+	+	-	+
F	Neigung Wirtgestein	0	0	0	+	-	+

Tabelle 5-1: aus NAB 14-99, Tab 3.1-1

Die quantitative Angabe von „Anzahl Störungszonen in Fallrichtung, in Streichrichtung sowie deren Ausdehnung in Meter“ (Zitat aus Tabelle von ENSI verteilt zusammen mit der Frage) ist aus meiner Sicht eindeutig ein Schritt zu viel in die reine Spekulation.

Niemand hat eine Ahnung welche anordnungsbestimmenden Störungszonen die Nagra in welchem Standortgebiet mit der 2D-Seismik übersehen hat und inwiefern die „gefundenen“ Störungen wirklich relevant sind. Aus meiner Sicht ist das beste was wir zurzeit in dieser Sache machen können die kritische Durchsicht der Tabelle 5-1 und anschliessend die rein qualitative Verwendung dieser Daten. Umgekehrt ergibt sich daraus auch eine klare Zielvorgabe für die 3D-Seismik, welche in dieser Sache quantitative und belastbare Angaben liefern muss.

5.7 Referenzen

NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02 Dossier II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NAB 10-39: Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.

NAB 12-22: 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12: Geologische Aufnahme der Aufzeitbohrungen (Teil 1). Aufzeitmessungen (Teil 2), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

- NAB 13-09: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-40: Gravity Data in Northern Switzerland and Southern Germany, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-80: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-17: Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbondrogs: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-57: Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-58: Reflexionsseismische Analyse der 'Braunen Doggers', Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-74: Vergleich der 2D-seismischen Linien mit dem geologischen 3D-Modell Wellenberg 2014, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-99: Unterlagen zum Platzbedarf in den Lagerperimetern der geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 17-01: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2017.
- Nagra (2011): Parameteranalyse 2D Seismik 2011 Jura Ost - Nördlich Lägern, Interoil E&P Switzerland AG, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2011.
- Nagra (2012a): „Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Nagra (2012b): 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12: Geologische Aufnahme der Aufzeitbohrungen (Teil 1) und Aufzeitmessungen (Teil 2)“ Dr. Heinrich Jäckli AG, DMT GmbH & Co KG, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.
- Nagra (2012c): 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012

Nagra (2012d): 2D-Seismik 2011/12 Nordschweiz: Feldbericht, DMT GmbH & Co KG, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen, 2012.

Assessment report of 2D-seismic interpretation within Stage 2 of the Sectoral Plan for Deep Geological Repositories (SGT-E2) (northern Switzerland).

**Beurteilungsergebnisse 2D-Seismik Review
(Sachplan Geologische Tiefenlager- Etappe 2)**

Expertenbericht zuhanden des
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in Brugg.

Dr. Anna Sommaruga, swisstopo expert

Fribourg, the 12th November 2015

Table of Content

6	Expertenbericht Dr. A. Sommaruga	113
6.1	Introduction	121
6.1.1	Goal of the review	121
6.1.2	Questions to be addressed	122
6.1.2.1	Questions of "Schritt 1 von SGT - Etappe 2"	122
6.1.2.2	Questions of "Schritt 2 von SGT - Etappe 2"	122
6.1.2.3	Additional questions on specific seismic lines for siting regions	122
6.1.2.4	Additional questions concerning tectonic zones to be avoided and space requirement	123
6.1.3	Participation in meetings	124
6.1.4	Relevant Nagra reports for the assessment	125
6.2	Data	127
6.2.1	Critical overview on contents of Nagra reports	127
6.2.2	Seismic data	129
6.2.3	Well data	131
6.2.4	Depth conversion of seismic profiles	136
6.2.5	Seismic maps	136
6.3	Geological elements interpreted on seismic profiles	136
6.3.1	Seismic horizons	136
6.3.2	Classification of the reflection quality of interpreted seismic horizons	138
6.3.3	Fault definition	140
6.3.4	Classification of seismically interpreted faults	143
6.3.5	Interpretation of faults by Nagra	144
6.3.6	Geological structures	145
6.4	Discussion of geological features on seismic profiles in defined geological siting region	150
6.4.1	Südranden siting region	150
6.4.2	Zürich Nordost siting region	152
6.4.3	Nördlich Lägern siting region	159
6.4.4	Jura Ost siting region	165
6.4.5	Jura-Südfuss siting region	170
6.5	Answers to addressed questions	174
6.5.1	Answers to questions of "Schritt 1 von SGT - Etappe 2"	174
6.5.2	Answers to questions of "Schritt 2 von SGT - Etappe 2"	174
6.5.3	Answers to additional questions on specific seismic lines for siting regions	175
6.5.4	Answers to additional questions concerning tectonic zones to be avoided and space requirement	175
6.5.4.1	Tectonic zone to be avoided in the Nördlich Lägern siting region.	176
6.5.4.2	Space requirement	178
6.6	Statement	178
6.7	References	179

List of Acronyms

Words in italic are written in German language.

ENSI: *Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat*

JO: Jura Ost

JS: Jura Südfuss

LDF: Layout-determining faults

Mio: Million

Nagra: *Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle*

NL: Nördlich Lägern

SGT – E1: *Sachplan geologisches Tiefenlager - Etappe 1* (SGT - Stage 1)

SGT - E2: *Sachplan geologisches Tiefenlager - Etappe 2* (SGT - Stage 2)

SGT – E3: *Sachplan geologisches Tiefenlager - Etappe 3* (SGT - Stage 3)

SR: Südranden

TWT: Two-way traveltime

ZNO: Zürich Nordost

Legend of Nagra's figures has been kept in German.

List of Figures

- Figure 6-1 : Location map of seismic profiles used by Nagra in SGT E2. The lines in red correspond to the new acquired (2011/2012) seismic data and the ones in black to the reprocessed old seismic lines. From NTB 14-01, Fig. 4.1-1.
- Figure 6-2 : Comparison of the quality of reprocessed seismic lines of the 1982 (a) / 1991 (b) surveys with the new acquired (2011/12) seismic lines. TWT = Two-way travel Time. Modified from NAB 13-10, Fig. 2-3. For location see Beilage 2-1, NAB 13-10.
- Figure 6-3 : Location map of wells (from NAB 14-34, Fig. 1-1). The Pfaffnau-1 well is located outside of the figure frame SW of the Schafisheim-1 well.
- Figure 6-4: Synthetic seismogram from Benken-1 well in TWT. From NAB 13-10, Beilage 2-2.
- Figure 6-5: Synthetic seismogram from Benken-1 well in depth. From NAB 14-34, Beilage 2-2.
- Figure 6-6: Additionally seismic horizon interpretation in Weiach-1 well for the “Brauner Dogger”. Comparison of the sonic log with the seismic line 91-NO-75. From NAB 14-58, Fig. 8.
- Figure 6-7: Description of the quality classes of the seismic horizons (on the left) and faults (on the right) as shown on the seismic lines. From NAB 13-10, Fig. 3-2.
- Figure 6-8: Classification of geological/tectonic elements and their relevance concerning the layout of a geological repository at depth (modified from NAB 14-88, Fig. 2-1).
 a) Area-defining geological elements = regional faults (*regionale Störungen*);
 b) layout-determining geological elements = layout-determining faults (*anordnungsbestimmende Störungen*).
- Figure 6-9 : Cross-section view of geological/tectonic elements and their relevance concerning the layout of a geological repository at depth (see Figure 6-8 for legend). Modified from NAB 14-88, Fig.2-2.
- Figure 6-10: Location map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided (*zu meidende tektonische Zonen*) in northern Switzerland. From NAB 14-01, Fig. 4.4-1.
- Figure 6-11 : Tectonic map of northern Switzerland. Additionally dashed thick red line corresponds to the Jura main thrust. Dashed thick blue line corresponds to the front of the Jura deformation taken from seismic lines. Modified from NTB 14-02, Beilage 4-1.
- Figure 6-12 : Location of regional faults and related structures across the Top Liassic horizon TWT map. From NAB 13-10, Fig. 6-1.
- Figure 6-13: Location of the Permo-Carboniferous troughs and the crystalline basement as interpreted in the NAB 14-17 report (Beilage 6-17). For remarks on wells, see also chapter 6.2.3 well data)
- Figure 6-14: Topography and quaternary filled channels in the Südranden siting region. EN: Enge; KR: Klettgau-Rinne; NH: Neuhauserwald-Rinne; RR: Rheinfal-Rinne; WA: Wagental. From NTB14-02, Dossier III, Fig. 4.4-10.
- Figure 6-15: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Zürich Nordost siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated in Nagra’s figure, only intervals of 25m are mentioned in

the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra report figures (references indicated below the legend).

- Figure 6-16: Location of the tectonic zone to be avoided (taken from Fig.4.4-4, NTB 14-02 Dossier II) in the Zürich Nordost siting area on the interpreted seismic line 83-SE-03 (from NAB 14-17, Beilage 6-12). According to Nagra, the tectonic zone to be avoided has been determined for this area on gravity data and on the Permo-Carboniferous through map. The interpretation of the Pre-Mesozoic units and faults of this TWT version line shows slight differences with the depth version presented in NTB 14-02 (Fig. 4.4-4). For location, see Figure 6-15.
- Figure 6-17: Illustration of the eastern part of the seismic line 91-NO-75 in depth (on top) and in TWT below. Tectonic zone to be avoided, regional fault zone and *flexur* have been added according to the CMP location on the Figure 6-15. For legend for the bottom picture see Figure 6-16 and for location see Figure 6-15.
- Figure 6-18: Illustration of the strike seismic line 91-NO-77 in TWT on top and converted to depth as a cross-section at the base. On the left, enlargement of the area in the blue rectangle on the seismic line. In the seismic section, the well name is Benken instead of Weiach (mistake on Nagra's figure). Regional fault zone and *flexur* have been added according to the CMP location on the Figure 6-15. For legend see Figure 6-16 and for location see Figure 6-15
- Figure 6-19: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Nördlich Lägern siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated, only intervals of 25m are mentioned in the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra reports (references indicated below the legend).
- Figure 6-20: Interpretation of the faults (LDF) south of the Siglistorf anticline along three seismic lines in TWT. For reference of the figures, see below the lines. Black circles correspond to fault discussed in text. Tectonic zone to be avoided, regional fault zone and *flexur* have been added according to the CMP location on the Figure 6-15. For legend see Figure 6-16 and for location, see Figure 6-19.
- Figure 6-21: Seismic line 11-NS-35 (PSDM version, scale in depth). On top non-interpreted and below interpreted seismic line (from A2-1-13, NAB 14-34). For arrows number 1, 2, 3, see explanations in text. Tectonic zone to be avoided has been added according to the CMP location from the Figure 6-15. For legend see Figure 6-17 and for location see Figure 6-19.
- Figure 6-22: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Jura Ost siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated, only intervals of 25m are mentioned in the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra reports (references indicated below the legend).
- Figure 6-23: Southern part of the dip seismic line 11-NS-04 in depth (PSDM version). Tectonic zone to be avoided and *flexur* have been added according to the CMP location on the Figure 6-22. For legend see Figure 6-17 and for location see Figure 6-15.

Figure 6-24: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Jura Südfuss siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated, only intervals of 25m are mentioned in the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra reports (references indicated below the legend).

Figure 6-25: Interpretation of the Born anticline on three different seismic lines or cross-section. Regional fault zone has been added according to the CMP location from the For legend see Figure 6-17, Figure 6-18 and Figure 6-20. For location map see .

Figure 6-26: Alternative version of NTB 14-02 Dossier II Fig. 4.4-5 with contours of the Base Mesozoic horizon shown on top of the regional fault zone polygons. From Nagra, inserted in the answer at *Frage 63_Flexur*.

List of Tables

Tabelle 1-1: *Annahme für Anzahl anordnungsbestimmenden Störungen innerhalb des Lagerperimeters gemäss NAB 14-99 sowie ergänzende Rechenfälle der Nagra. Ergänzende Rechenfälle sind Rechenfälle der Nagra, welche im NAB 14-99 nicht dokumentiert, aber von der Nagra durchgeführt werden. Diese Daten liegen dem ENSI vor.*

Tabelle 5-1: aus NAB 14-99, Tab 3.1-1

Table 6-1: Nagra's aims for the 2D-seismic evaluation in Stage 2 (SGT - E2). Presented by H. Madritsch in a meeting at ENSI (7. November 2014, ENSI 33/410 minutes).

Table 6-2 : List of the Nagra reports available for the review. Reports highlighted in grey have been evaluated in details.

Table 6-3: Well list with convention for picking of the seismic horizons. Wells are tied to old reprocessed seismic lines. BMz = Base Mesozoic; TMk = Top Muschelkalk, TLi = Top Liassic, BMa = Base Malm; BTe = Base Tertiary. From NAB 13-10, Tab. 2.

Table 6-4 : Classification of the reflection quality on the interpreted seismic horizons. From NAB 13-10.

Table 6-5 : Description of the quality classes of the seismically determined faults (as shown on the seismic lines). From NAB 13-10, Tab. 5.

Table 6-6: Seismic lines and related enclosures (*Beilagen/Anhänge – A-*) in reports for the Südranden geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

Table 6-7: Seismic lines and related enclosures (*Beilagen/Anhänge – A-*) in reports for the Zürich Nordost geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

Table 6-8: Seismic lines and related enclosures in reports for the Nördlich Lägern geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

Table 6-9: Seismic lines and related enclosures in reports for the Jura Ost geological siting area. In the last column are the specific questions from ENSI.

Table 6-10: Seismic lines and related enclosures in reports for the Jura-Sudfüss geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

Zusammenfassung

Diese Auswertung beruht auf mehreren Nagra Berichten (die meisten davon öffentlich zugänglich) sowie auf Besprechungen betreffend der Interpretation von neu akquirierten (2011/2012) und alten re-prozessierten seismischen Linien aus der SGT-E2. Obwohl viele Berichte herangezogen wurden, enthalten nur drei Berichte die Interpretation der seismischen Profile (NAB 13-10, NAB 14-34, NAB 14-17) und ein separater Bericht (NAB 14-02, Dossier II) stellt die geologischen Strukturen vor, zusammen mit den regionalen Bruchzonen und den zu meidenden tektonischen Zonen. Ein abschliessender Bericht mit einer Synthese zur seismischen Interpretation fehlt jedoch.

Die 2D-seismischen Daten wurden von der NAGRANagra einwandfrei interpretiert. Die seismischen Horizonte wurden genau (exakt) an die Bohrungen angepasst und ihre Interpretation ist in der Nordschweiz meistens durchgehend genau. Der Top Opalinuston Horizont bleibt jedoch weitgehend konzeptuell und der Basis Mesozoikum Horizont zeigt eine ungleiche Qualität der Reflektoren im gesamten Gebiet. Die Interpretation der seismischen Horizonte innerhalb der regionalen Zone des Jurahauptüberschiebungsbruches hätte mit etwas mehr Details präsentiert werden können.

Die regionalen Störungszonen wurden von der Nagra alle identifiziert und auf den seismischen Daten gut lokalisiert. Zusätzlich sind die Grenzen der zu meidenden tektonischen Zonen in den Standortgebieten auf den Karten hervorgehoben. Dieselben Zonen sind jedoch nur auf wenigen seismischen Profilen angezeigt. Das Herausstellen dieser Zonen ist dadurch gerechtfertigt dass die Anwesenheit von Brüchen oder Strukturen in den mesozoischen oder prä-mesozoischen Einheiten in den letzten 5 Millionen Jahren möglicherweise aktiv waren auch in Zukunft reaktiviert werden könnten. Erforschungen in der SGT3 sollten die genau Geometrie und den Versatz dieser Brüche genauer abklären. Betreffs den Aspekten der regionalen Bruchzonen und der zu meidenden tektonischen Zonen, hat die Nagra Ihre Ziele (Identifizierung des geologischen Kontextes der regionalen Brüche und der zu meidenden tektonischen Zonen) erfolgreich erfüllt (erreicht) obwohl man in einigen Fällen genauere Darstellungen zu den verschiedenen Argumenten hätte präsentieren können.

Die Lage der anordnungsbestimmenden Störungen (Brüche ohne seitliche Korrelation) muss während der SGT Etappe 3 genauer bewertet werden um die Konturen der Lagerperimeter der SMA und HAA Lager zu verfeinern. Die Umriss der Brüche die die Basis Mesozoikum am Rande des Permo-Karbonbeckens durchbrechen sind auf der 2D-Seismik nicht sehr gut (unzureichend) definiert. Auf dieser 2D-Seismik bleibt der genaue Standort des Permo-Karbondrogens zum Teil spekulativ. Das Verständnis der Entwicklung des Permo-Karbon Grabens war für die Nagra in der Interpretation der Etappe SGT - E2 nicht ein Hauptobjektiv. Im nächsten Schritt (Etappe 3), sollten zwei Aspekte zur Verfeinerung der Umriss der Standorte eine wesentliche Rolle spielen: ein 3D-Seismik Kampagne und ein kinematisches Model des Lagergebietes um somit das Verständnis zur geologischen Entwicklung des Permo-Karbondrogens zu verfeinern. Verbesserte genauestens auf geophysikalischen Daten basierende bilanzierte Profile durch das in SGT - E2 erforschte Gebiet sollten erstellt und integriert werden. Sogar Details in den Bruchzonen – als nicht relevant für die Lager betrachtet – sollten präzise dargestellt werden. Andernfalls könnte ein Problem der Glaubwürdigkeit auftreten. Basierend auf diesen neuen Modellen könnte die Nagra das Risiko einer Reaktivierung von Brüchen einschätzen/abwägen.

6.1 Introduction

6.1.1 Goal of the review

This review is done in the frame of a mandate by swisstopo (project contract: FL403-SGT-2 of the 31. January 2014 with extension on the 30. April 2015) to assess the tectonic interpretation from Nagra on the 2D-seismic data in northern Switzerland during Stage 2 of the SGT. This report is exhaustive with figures, tables and descriptions upon request of swisstopo. This report is also published in the expert report of swisstopo (ENSI 33/470).

This swisstopo mandate is included in a mandate from ENSI (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate) on the assessment of the 2D-seismic data of Stage 2 (*SGT – E2, Sachplan geologisches Tiefenlager - Etappe 2*) elaborated by Nagra which is in charge to propose sites to host a repository for radioactive waste. The Stage 2 aims at selecting at least two potential geological siting regions for each repository type for further investigation in SGT - Stage 3. For this assessment, ENSI established an expert team focusing on the processing of the seismic data and on the geological and tectonic interpretation of the seismic data respectively.

In Stage 1 (*SGT – E1*), Nagra selected five geological siting regions in Northern Switzerland to be investigated for disposal of low and intermediate level waste (L/ILW, respectively in German: *SMA*), while a repository for high level waste (HLW, respectively in German: *HAA*) was only considered suitable in three of the five siting regions (ZNO, NL and JO). The major aim of Nagra's work (Table 6-1) for the geological part-in the 2D-seismic interpretation in the Stage 2 (*SGT – E2*) is to identify the geological settings (faults and structures), especially regional faults, tectonic zones to be avoided and the layout-determining faults. It was also estimated if these features could be reactivated during a period of 1 Mio years considered the lifetime of a radioactive waste repositories. Minor aims from Nagra are listed in Table 6-1 (e.g. better understanding of the Permo-Carboniferous troughs).

Ziele der 2D-Seismik Auswertung

Hauptziele:

1. Verifikation & Präzisierung des Verlaufs von regionalen Störungszonen
2. Information zu anordnungsbestimmenden Störungen innerhalb der Standortgebiete
3. Vertiefung des regionalen kinematisch-tektonischen Verständnisses um die HAA-Gebiete Bözberg und Nördlich Lägern im Hinblick auf SGT- Etappe 3

Nebenziele:

- Input zu Ungewissheiten Tiefenlage & Mächtigkeit Wirtsgesteine
- Verifikation von Verlauf & Tiefe der wichtigsten quartären Felsrinnen
- Identifikation von Faziesübergängen (z.B. im Braunen Dogger)
- Besseres Verständnis des Permokarbondrogs
- Feldparameter-tests für zukünftige 3D-Seismik-Kampagnen

Table 6-1: Nagra's aims for the 2D-seismic evaluation in Stage 2 (SGT - E2). Presented by H. Madritsch in a meeting at ENSI (7. November 2014, ENSI 33/410 minutes).

ENSI addressed specific questions to each expert, which were subdivided into two steps (*Schritt 1* and *Schritt 2*) for the review process. Questions are addressed in chapter 6.1.2 and answered in chapter 6.5 respectively. For the author, additional questions on specific seismic lines are addressed in chapter 6.1.2.3 for each siting region and answered in sub-chapter from chapters 6.4.1 to 6.4.5.

Upon invitation by ENSI, several meetings (chapter 6.1.3) with the different experts fostered discussion on the addressed questions. Nagra and Proseis AG collaborators attended a couple of these meetings to answer questions and clarify facts.

6.1.2 Questions to be addressed

The questions were presented in German by ENSI in the contract (H-101002) and in meetings, and are not translated in English. The answers of the questions are discussed in Chapters 6.4 and 6.5.

6.1.2.1 Questions of “Schritt 1 von SGT - Etappe 2“

Frage 5.1: *Sind die Interpretationen der Strukturen der seismischen Linien nachvollziehbar?*

Frage 5.2: *Wurde bei der seismischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?*

6.1.2.2 Questions of “Schritt 2 von SGT - Etappe 2“

Frage 5.3: *Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen, von anordnungsbestimmenden Störungen und von konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen nachvollziehbar?*

Frage 5.4: *Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien vollständig?*

Frage 5.5: *Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?*

6.1.2.3 Additional questions on specific seismic lines for siting regions

Five investigated geological siting regions were considered in this review: (1) Südranden (SR), (2) Zürich Nordost (ZNO), (3) Nördlich Lägern (NL), (4) Jura Ost (JO) and (5) Jura-Südfuss (JS).

Südranden siting region (1)

12-NS-66: Das ENSI wünscht sich für dieses Profil eine Aussage zur generellen Betrachtung von Multiplen im Grundgebirge.

12-NS-75: Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.

12-NS-77: Das ENSI stellt sich die Frage, wie gut die Neuhauserwald-Rinne (CMP 4550 bis 4850) und damit einhergehende mögliche tektonische Störungen im Grundgebirge (Rand eines Permokarbon-Troges?) erkennbar sind.

Zürich Nordost siting region (2)

91-N0-77: Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.

91-N0-68: Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.

Nördlich Lägern siting region (3)

11-NS-18: Wie gut ist die Datengrundlage für die eingezeichneten Störungen im Grundgebirge? Sind diese belastbar? Bei diesem Profil geht es generell um die Belastbarkeit bei der Interpretation des Grundgebirges.

11 -NS-20: Die Nagra klassifiziert die nördliche Zone im Standortgebiet als tektonisch zu meidende Zone. Grund dafür sind die Trogränder des Permokarbondrogens und Störungen in der Trias und des Juras. Frage: Wie belastbar sind dazu die Erkenntnisse aus der 2D-Seismik in diesem Profil? (CMP 4200 bis 5200).

11-NS-35: Die Nagra schlägt für Nördlich Lägern einen Lagerperimeter im östlichen Teil des Standortgebietes vor. Frage: Wie belastbar sind die interpretierten Störungen im Grundgebirge und im Jura und in der Trias zwischen CMP 7200 und 8200? Gibt es andere Interpretationsvarianten?

Jura Ost siting region (4)

11-NS-04: Das Profil zeigt ruhige Lagerungsverhältnisse, einzig zwischen CMP 2900 bis 3000 ist im Tiefenbereich der Trias eine Variation in der Mächtigkeit zu beobachten. Ist diese Variation ein Artefakt (z. B. Geschwindigkeitsmodell) oder möglicherweise ein Effekt der Tektonik?

11-NS-06: Dieses Profil zeigt Ähnlichkeiten mit dem Profil 11-NS-04. Wie kann die Anomalie (Verdickung) bei CMP 5800 bis 5900 im Bereich des Muschelkalks interpretiert werden? Existieren ähnliche Strukturen auf der Nachbarlinie 11-NS-04?

11-NS-35: Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.

Jura-Südfuss siting region (5)

12-NS-42: Der Fokus der Beurteilung in diesem Profil liegt generell auf dem OPA. Spezifische Frage: Wie belastbar ist die Interpretation der Störung bei CMP 3050 bis 3150 im Bereich des OPA? Wie signifikant ist die potentielle Verdickung in der Trias im Teil des Profils süd-südöstlich CMP 2500?

12-NS-44: Der Fokus der Beurteilung in diesem Profil liegt auf den Effinger-Schichten und der Fortsetzung der Born-Engelberg-Struktur in dieses Gebiet. Welche Auswirkungen hat die Verdickung der Trias (duktilen Verhalten) auf die sich spröde verhaltenden Kalkbänke der Effinger-Schichten?

12-NS-53: Im Grundgebirge sind starke Reflexionsbündel zu erkennen. Handelt es sich hier um Permokarbon (zwischen CMP 3600 und 5200)?

6.1.2.4 Additional questions concerning tectonic zones to be avoided and space requirement

Frage 6.1: Ist der Zusammenhang zwischen dem Rand des Nordschweizer Permokarbondrogens, der Flexur (NTB 14-01, Dossier II, Fig 4.4-5) und dem Störungsbild aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland belastbar?

Frage 6.2: Wie aussagekräftig sind die Neigungskarten des Top Lias?

Frage 6.3: Ist die von der Nagra auf Basis der 2D-Seismik ausgewiesene Flexur am nördlichen Rand des Standortgebiets NL nachvollziehbar und belastbar?

Frage 6.4: *Kann aufgrund der Erfahrungen aus dem Standortgebiet ZNO (Hinweis auf Zusammenhang zwischen Permokarbonatrog, Flexur und Strukturzone) für das Standortgebiet Nördlich Lägern eine potentielle Strukturzone antizipiert werden?*

Frage 7: *Ist es fachlich nachvollziehbar und gerechtfertigt, eine unterschiedliche Anzahl an anordnungsbestimmenden Störungen in den Lagerperimeter der Standortgebiete anzunehmen (zum Beispiel dass für die Standortgebiet NL und JS die Anzahl der Störungszonen viel grösser ist als für die anderen)? Wenn ja, was ist die Datengrundlage für diese Annahme?*

6.1.3 Participation in meetings

My participation in meetings started in August 2013. The ENSI expert team had earlier meetings where I was not involved at that time. Presentations given by Nagra or Nagra-Proseis AG team and ENSI collaborators during the below listed meetings gave supplementary information not included in the reports relevant for this review, but certainly in prior reports (Table 6-2).

- 19.08.2013: Brugg, ENSI office. Kick-off Meeting der ENSI-Experten für den Review der 2D-Seismik der Nagra im Rahmen von Etappe 2 SGT. (ENSI 33/314).
- 22.11.2013: Zürich-Oerlikon, Proseis AG office. Review Interpretation 2D-Seismik: Meeting bei Proseis AG Zürich. Discussion on the NAB 13-10. (ENSI 33/332).
- 17.03.2014: Fribourg, University, Anna's office. Presence of T. van Stiphout and Ch. Nussbaum. Presentation of my review on the NAB 13-10.
- 31.03.2014: Brugg, ENSI office. *Workshop: Diskussion der Beurteilungs-ergebnisse 2D-Seismik-Review Schritt 1*(ENSI 33/359)
- 07.11.2014: Brugg, ENSI office. *Beurteilung 2D-Seismik der Nagra im Rahmen der SGT Etappe 2 Meeting zu Review Schritt 2.* (ENSI 33/410).
- 10.03.2015: Brugg, ENSI office (morning). Koordinations-Meeting swisstopo-Sommaruga. (ENSI 33/426).
- 10.03.2015: Zürich-Oerlikon, Proseis AG office (afternoon). Fachgespräch zur Interpretation der 2D-Seismik SGT Etappe 2. Discussion on the NAB 14-34. (ENSI 33/430).
- 16.03.2015: Bern, swisstopo (afternoon). Mechanical analysis of the eastern end of the Jura (NE Switzerland): role of basement ramps and inherited fault. Minutes elaborated by swisstopo.
- 27.04.2015: Brugg, ENSI office. Workshop: Beurteilungsergebnisse 2D-Seismik-Review SGT Etappe 2. (ENSI 33/436)
- 22.05.2015: Brugg, ENSI office. Workshop: Fachsitzung zur Interpretation der 2D-Seismik der Nagra. (ENSI 33/541)
- 25.08.2015: Bern, swisstopo. Meeting zur kinematischen Modellierung geologischer Profile.(ENSI 33/450).

In addition to afore listed meetings, several informal meetings were organized at Fribourg University with Christophe Nussbaum (person in charge of this review at swisstopo) in order to organize

the administrative part of this review (contracts, planning with ENSI) and to discuss scientific issues.

After the last scientific meeting (22. Mai 2015), ENSI asked me to address questions to Nagra regarding few discussed topic. Two questions (*Frage 33* and *Frage 34* in NAB 17-01) have been sent to ENSI a couple of days after (29. Mai 2015). Nagra answered in June (21. June 2015); see questions and answers in NAB 17-01 and discussion in chapter 6.4.2.

More recently a series of questions (*Frage 63* in NAB 17-01) addressed to Nagra has been sent to ENSI (1. October 2015); these questions regarding *Flexur* are related to the additional questions from ENSI on the tectonic zones to be avoided and flexures (additional questions in chapter 6.1.2.4 and discussion in chapter 6.3.6).

6.1.4 Relevant Nagra reports for the assessment

Many reports were available for this review (chapter 1.4). Table 6-2 shows the list of reports that were considered for this assessment. The highlighted (in grey) reports were evaluated with special attention. Short critical overview on contents of specific Nagra reports is given in chapter 6.2.1.

Nagra reference	Title	Authors	Date
NAB 13-10	Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. Textband and Beilagenband.	H. Madritsch, B. Meier, P. Kuhn, Ph. Roth, O. Zingg, S. Heuberger, H. Naef, Ph. Birkhäuser	Juni 2013
NAB 13-40	Gravity Data in Northern Switzerland and Southern Germany.	A.G. Green, K. Merz, U. Marti, T. Spillmann	July 2013
NTB 14-01 Anhang	Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete	Nagra	Dezember 2014
NTB 14-02 - Dossier I	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier I. Einleitung.	Nagra	Dezember 2014
NTB 14-02 - Dossier II Anhang	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier II. Sedimentologische und tektonische Verhältnisse.	Nagra	Dezember 2014
NTB 14-02 - Dossier III Anhang	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier III. Geologische Langzeitenentwicklung.	Nagra	Dezember 2014
NTB 14-02 - Dossier VII	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier VII. Nutzungskonflikte.	Nagra	Dezember 2014
NTB 14-02 - Dossier VIII	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier VIII. Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit.	Nagra	Dezember 2014
NAB 14-17	Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbons: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schwere-Daten.	H. Naef, H. Madritsch	Dezember 2014
NAB 14-34	Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011-12. Textband, Beilagen, Anhangen	B. Meier, P. Kuhn, S. Muff, P. Roth, H. Madritsch	September 2014
NAB 14-57	Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten	B. Meier, G. Deplazes	Oktober 2014
NAB 14-58	Vorabdruck_Reflexionsseismische Analyse des „Braunen Doggers“	B. Meier, G. Deplazes	Dezember 2014
NAB 14-88	Simulation of layout-determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for sub-surface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland	G.W. Lanyon, H. Madritsch	December 2014
NAB 14-105	Regionale geologische Profilschnitte durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Ferschubdeformation im östlichen Faltenjura: Arbeitsbericht zu SGT-Etappe 2.	P. Jordan, A. Malz, S. Heuberger, J. Pietsch, J. Kley, H. Madritsch.	März 2015 (available as expert since 27.04.2015)

Table 6-2 : List of the Nagra reports available for the review. Reports highlighted in grey have been evaluated in details.

6.2 Data

6.2.1 Critical overview on contents of Nagra reports

Information on the structures and the faults was included in two main reports (NAB 13-10 and NAB 14-34) concerning the geological interpretation of the seismic profiles from Northern Switzerland. Additional important information or details in order to understand the geological setting, the tectonic zones to be avoided, and the parameters defining the geological siting region were obtained from other reports (see list in Table 6-2).

Each Nagra (NAB or NTB) report provides a wealth of important information. A noteworthy effort has been done in presenting interpreted and non-interpreted versions of the seismic lines. Some reports are elaborated by Nagra's contractors and are written in parallel by different authors. This leads to some inconsistencies in linking work from one report to another one. A synthesis of the seismic interpretation reports which includes all processing versions (PSTM, DTConv, PSDM) for the Mesozoic layers combined with the interpretation of the Permo-Carboniferous trough is missing. The reader has to go through all the reports to find documents related to a specific seismic line (e.g. Table 6-6 to Table 6-10) and then search for explanations in text – especially if there are inconsistencies from one version to another one. In the 10.03.2015 meeting, Nagra suggested to use all the versions for the review (excerpt from Minutes, ENSI 33/426: *“Für die Betrachtung bittet die Nagra alle Versionen (PSTM, PSDM und DTconv) zu nutzen. Bei Unklarheiten betreffend Störungen wird die Nagra auf Rückfrage klar Position beziehen, welche Interpretation relevant ist.”*).

Several maps (seismic location map, geological map, TWT/Depthing/Velocity/Thickness map for horizons) and seismic lines are presented in Appendices (*Beilagen B/Anhänge A*). These are helpful for understanding the work. The updated tectonic map discussed in NAB 13-10 was available only in NTB 14-02 Dossier II (Beilage 4-1). This tectonic map should have been combined with the CMP seismic location map. This is missing as well as a map with location of seismic lines (with CMP) on top of regional fault zones and tectonic zones to be avoided. This would help the reader to localize these zones on the seismic lines. This type of map (e.g. Figure 6-15) has been created by swisstopo for its experts in order to facilitate the review.

NAB 13-10

This *Arbeitsbericht*, referred also as Madritsch et al. 2013, presents the seismic interpretation in time domain of the new acquired (2011/2012) seismic profiles. The location and the trend of the regional faults and the small-scale faults are mapped. The regional fault zones, the tectonic zones to be avoided and the layout-determining faults are not shown on the profiles and not discussed. Links between field structure observations and seismic data interpretation are explained. An updated tectonic map is missing in this report. This report is one of the main reports for this evaluation.

NTB 14-01

This *Technischer Bericht* has not to be reviewed by the 2D-seismic reviewer, but was provided as additional information. In this *Technischer Bericht*, we only considered a couple of figures (e.g. Fig. 4.4-1) regarding the limit of the repository perimeter (*Lagerperimeter*), to be able to focus on relevant target regions or locations.

NTB 14-02 Dossier II

This *Technischer Bericht* (Dossier II: Sedimentological and geological settings) acts as a kind of synthesis report on the geological outcome of the 2D-Seismic interpretation. It includes some geological fundamentals, few partially balanced cross-sections (without description) based on the 2D-seismic interpretation and the location of the regional fault zones and the tectonic zones to be avoided for each siting region. The updated tectonic map of North Switzerland is enclosed and shows the lateral extend of the main geological structures. However, a seismic location map with CMP on top this tectonic zone map (see discussion above) is missing. The geological interpretation of the sections in this report refers to Jordan et al. 2015 report, which was not available at the time of the main phase of the review and therefore not considered.

NTB 14-02 Dossier III

This *Technischer Bericht* (Dossier III: Evolution of the long-term geology) consists of the description of the recent and long-term geology: neotectonics and erosion. In this technical report, we only considered figures (e.g. Fig. 4.4-10).

NAB 14-17

This *Arbeitsbericht* presents the geological interpretation of the Permo-Carboniferous troughs with a major update of the tectonic map of the Permo-Carboniferous troughs from northern Switzerland. The location of the troughs is modeled based on the gravity anomaly map (Green et al. 2013). The authors distinguish between three seismic facies within the central graben. This report is one of the relevant reports for this evaluation.

NAB 14-34

This report completes the NAB 13-10 report and both reports are main reports for this evaluation. It presents the depth conversion of the geological interpretation of the Nagra 2D-seismic survey 2011/2012 and of the older seismic lines. The interpretation of the Near Top Opalinuston horizon is new (not included in the other reports). There is a discussion on the evaluation and differences of the structures (faults) in depth domains. It includes a short description of the layer/thickness model and estimation of the uncertainties of the depth/thickness values for the seismic horizons and for the host rocks.

NAB 14-57

This *Arbeitsbericht*, referred also as Meier & Deplazes (2014a), presents a seismic facies analysis of the “*Effinger Schichten*” layers; we only considered figures (Figs. 10 and 13, NAB 14-57) and *Beilagen* (Beilage 6, Beilage 7, Beilage 8).

NAB 14-58

This *Arbeitsbericht*, referred also as Meier & Deplazes (2014b), presents a seismic facies analysis of the “*Braune Dogger*” layers; we only considered figures (Fig. 8, Fig. 9, Fig. 11 from NAB 14-58) and *Beilagen* (Beilage 3, Beilage 6).

NAB 14-88

This *Arbeitsbericht* discusses how potentially the layout-determining fault could tectonically affect the different geological siting regions and what the implications are. This study, based on few data, is mainly modelling and conceptual and therefore the practical use of the results remains questionable.

NAB 14-105

This *Arbeitsbericht*, referred also as Jordan et al. 2015, presents geological balanced cross-sections from Northern Switzerland. Several authors have elaborated these sections. This report has unfortunately been received too late in the review process and could not be evaluated here. Some cross-sections are already known through reading of the NTB 14-02 Dossier II report.

6.2.2 Seismic data

Seismic data available for this review consist of two sets (Figure 6-1):

- 33 old reprocessed 2D-seismic reflection profiles acquired by Nagra between 1982-1992;
- 20 new acquired (2011/2012) 2D-seismic reflection profiles.

A third set of seismic data was used by Nagra for the seismic interpretation. It consists of 19 confidential seismic lines (acquired between 1979-1990) owned by SEAG and reprocessed by Nagra (NAB 13-10). These seismic lines are inserted neither in the NAB 13-10 nor in NAB 14-34 reports. Only one profile (83-SE-03, Beilage 6-12, NAB 14-17) of these SEAG seismic profiles is included in the report NAB 14-17. All SEAG lines could be consulted at Proseis AG office if necessary.

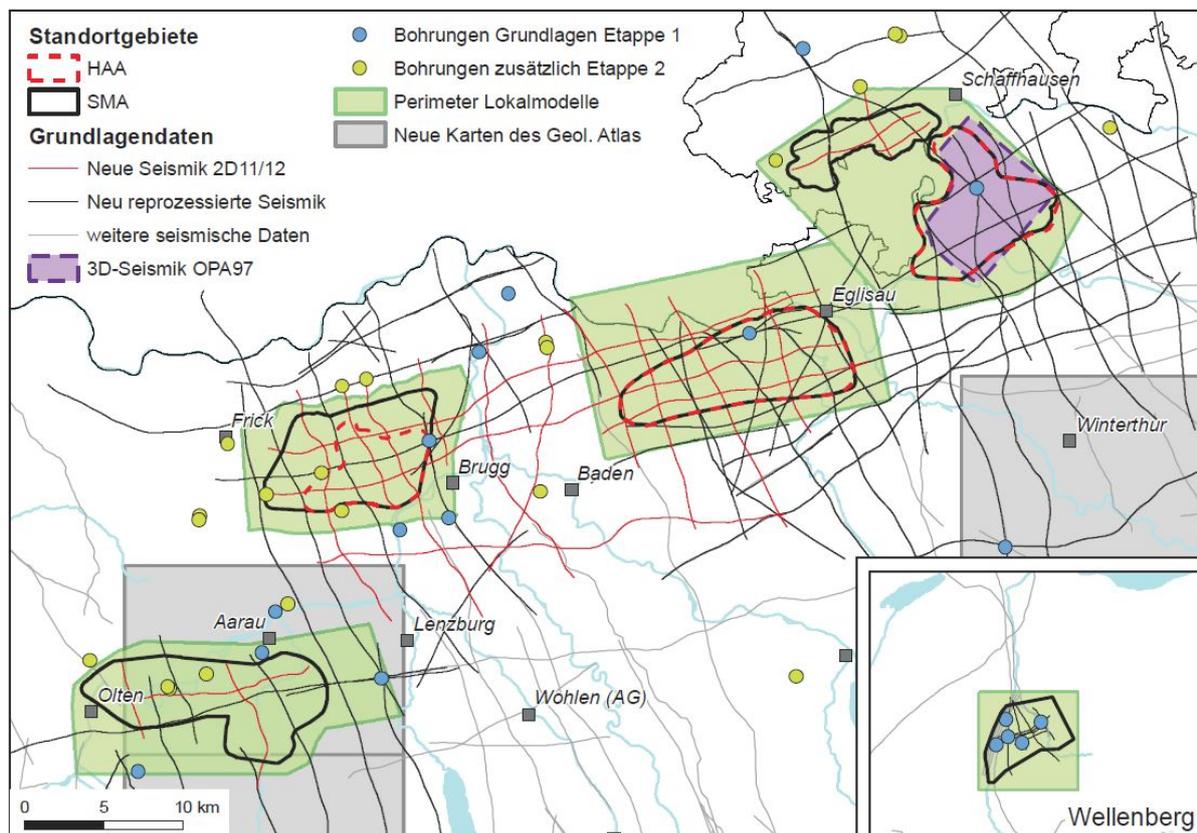


Figure 6-1 : Location map of seismic profiles used by Nagra in SGT E2. The lines in red correspond to the new acquired (2011/2012) seismic data and the ones in black to the reprocessed old seismic lines. From NTB 14-01, Fig. 4.1-1.

The location of the new seismic survey filled the gap between the old seismic lines recorded by Nagra or by the petroleum industry (mainly SEAG) (Figure 6-1). Both sets provide enough 2D-seismic reflection data to localize the regional geological faults and the tectonic zones to be avoided in the selection process of the radioactive waste repository. The reprocessing of the older

lines has yielded in quality with higher resolution of the seismic image and a better lateral continuity of the reflections (Figure 6-2). The quality of the old seismic lines was variable; the reprocessing has produced a homogenous set of data with the same processing parameters representing reliable and high quality images of the subsurface. The new acquired seismic data have been processed in a good way that the resulting seismic images are reliable.

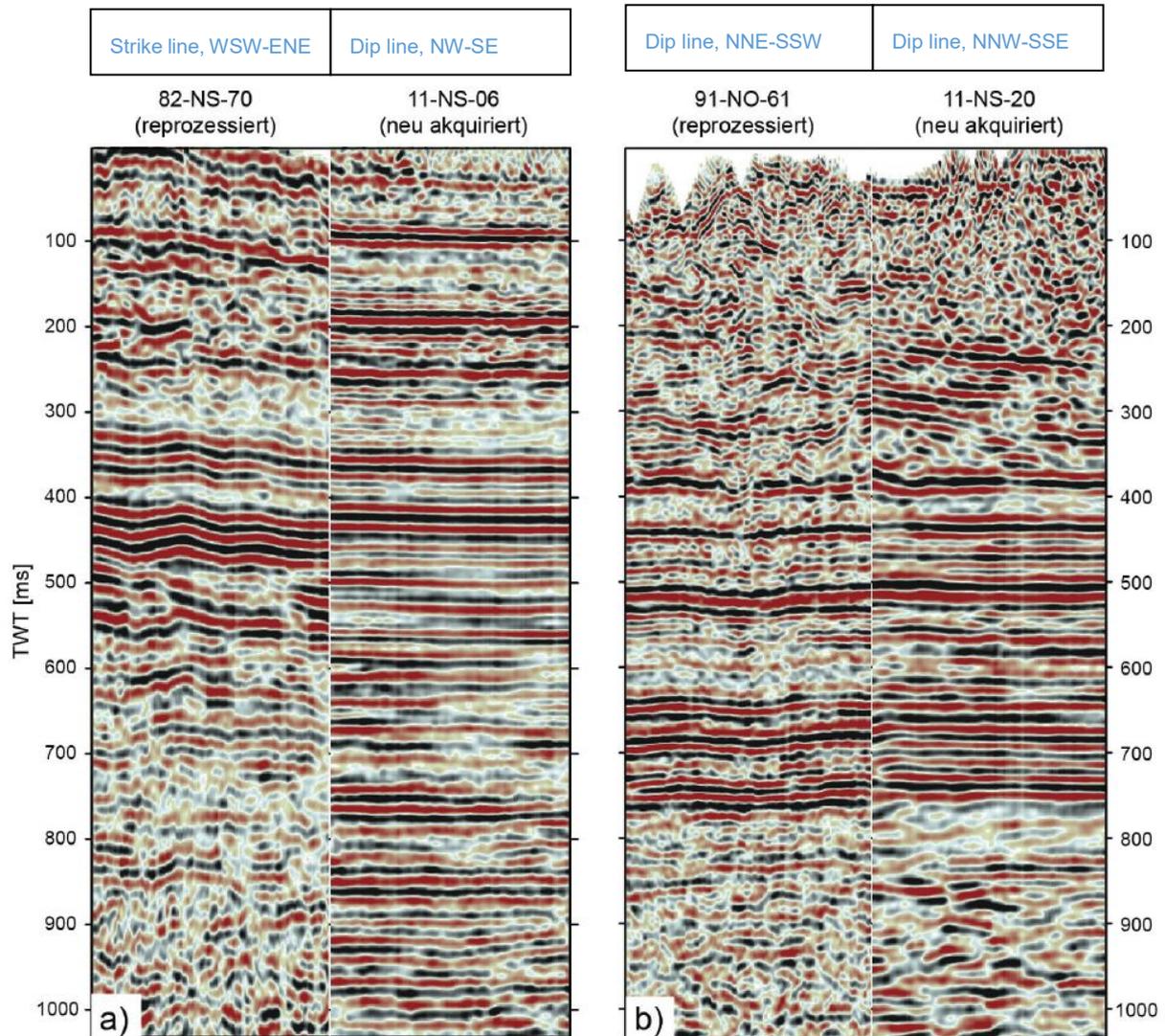


Figure 6-2 : Comparison of the quality of reprocessed seismic lines of the 1982 (a) / 1991 (b) surveys with the new acquired (2011/12) seismic lines. TWT = Two-way travel Time. Modified from NAB 13-10, Fig. 2-3. For location see Beilage 2-1, NAB 13-10.

In Figure 6-2, the horizontal scale is missing (it is not shown on the original figure in the NAB 13-10 report) and we assume that the horizontal scale is the same for the fourth lines. Nagra compares the seismic data quality of two seismic lines, which do not have the same direction. Directions have been added for the assessment on top of the a) strike line WSW-ENE versus dip line, NW-SE and b) two dip lines with a different direction (NNE-SSW, NNW-SSE). Although this is not an optimal way to compare the seismic quality of the lines, we can see an improvement of the seismic image from the old to the new acquired seismic surveys. Supposedly the line in the middle of the Figure 6-2a and b corresponds to the intersection line between the two lines. Both sets of seismic data (old reprocessed and new acquired) include high quality seismic lines, which are

suitable for a geological interpretation of the structures within the geological siting region. According to reports for Schritt 1 of the “Data processing” expert team (M. Riede and F. Wenzel), the processing of the seismic data has followed an optimal procedure resulting in a high quality seismic image.

The NAB 13-10 report includes in its *Beilagen* a profile of each of the new acquired seismic line at a 1:50'000 scale. The old reprocessed seismic data are in the Appendix (of NAB 13-10) at the same scale. The datum plane is not indicated on these plates, but we suppose 500m = 0 ms TWT. As mentioned in the report NAB 13-10 (p.4), Nagra applies a single Datum Plane to all the seismic lines, which is a logic procedure. On the seismic horizon map derived from the seismic interpretation of the lines (included in the *Beilage* of the same report), the Datum Plane (DP) is 500 m (*Bezugsniveau*).

Precise location maps with CMP points along the trace of the seismic lines are included in various reports. Regrettably, this type of seismic location map has not been provided as a layer on top of the tectonic map including the five investigation geological siting regions or on top of the map with the “tectonic zones to be avoided” (see also discussion in chapter 6.2.1). This makes detailed review and location of structures tedious and difficult.

6.2.3 Well data

About 10 deep wells are available in northern Switzerland for calibrating the seismic data (Figure 6-3). They were drilled for radioactive waste purpose (Nagra), for search of oil, or for geothermal purposes during different periods, but most of them in 1980's.

In the NAB 13-10 report, Nagra presented the correlation and seismograms in time for 9 wells (Weiach-1, Riniken-1, Schafisheim-1, Lindau-1, Leuggern-1, Böttstein-1, Pfaffnau-1, Benken-1 – see Figure 6-4, Siblingen-1). Additionally log data from Kaisten-1, Sonnengarten-1 and Schlatingen-1 have been mentioned in other reports (e.g. NAB 14-58). Five horizons have been calibrated and interpreted: Base Tertiary, Base Malm, Top Liassic, Top Muschelkalk and Base Mesozoic.

As explained by Nagra's collaborator during a meeting (22. November 2013), the new seismic survey has been land out with the objective to fill the gap between the old seismic grid rather than to better correlate the existing wells and seismic lines. Therefore, the new acquired seismic data are not tied to the wells (Table 6-3). In view of the good quality of the reprocessed seismic lines, we can support this decision.

Proseis AG together with Nagra's collaborators have done the interpretation of the well log data and the seismic data. From the boreholes, synthetic seismograms have been generated derived from the acoustic log and the density log data. The correlation and the synthetic seismograms are precise and well done. Even if reflectors are not always of the highest quality, a good correlation could be achieved. In the NAB 14-34 report, seismograms in depth of six wells are presented (Benken-1 – see Figure 6-5, Lindau-1, Pfaffnau-1, Riniken-1, Schafisheim-1, Weiach-1). In addition to the above mentioned horizons, the Near Top Opalinuston reflector is also described.

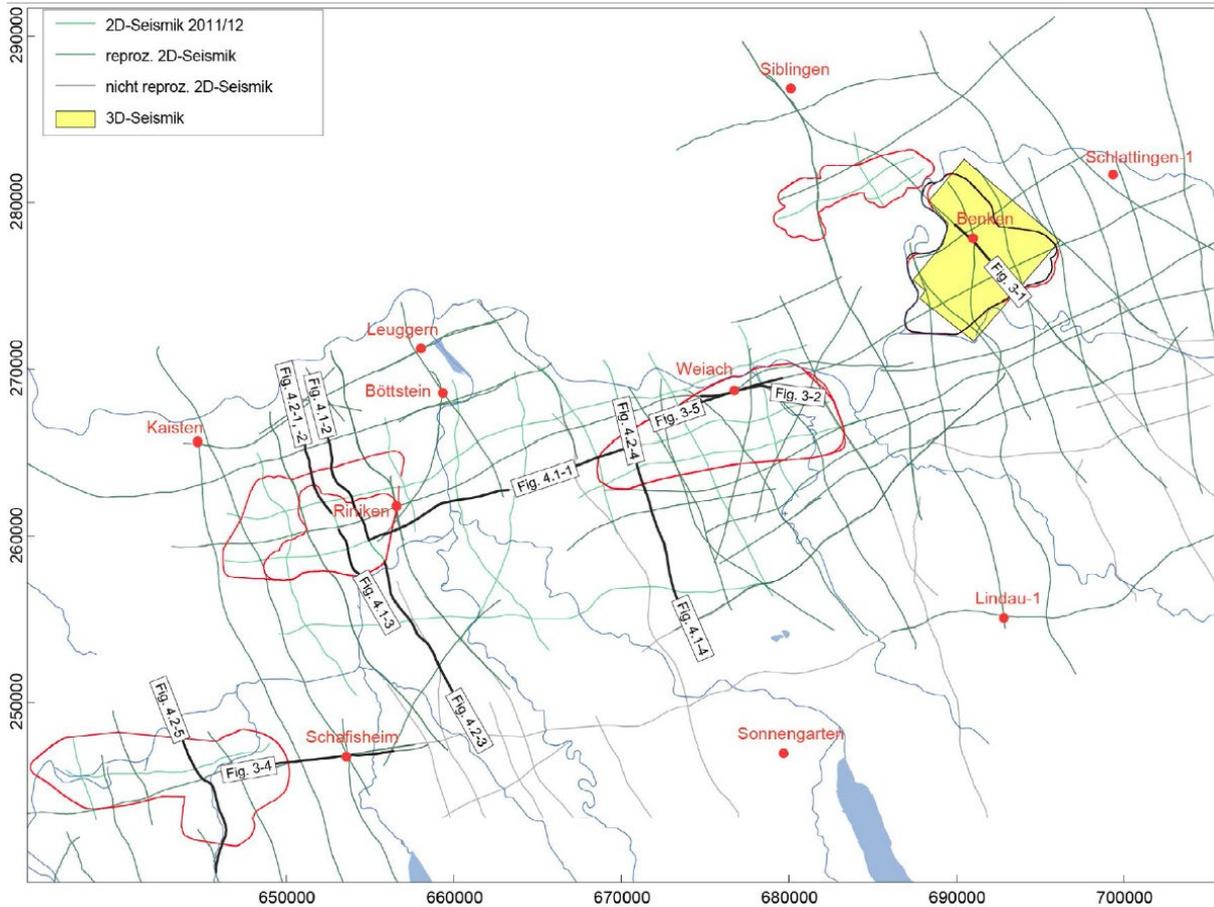


Figure 6-3 : Location map of wells (from NAB 14-34, Fig. 1-1). The Pfaffnau-1 well is located outside of the figure frame SW of the Schafisheim-1 well.

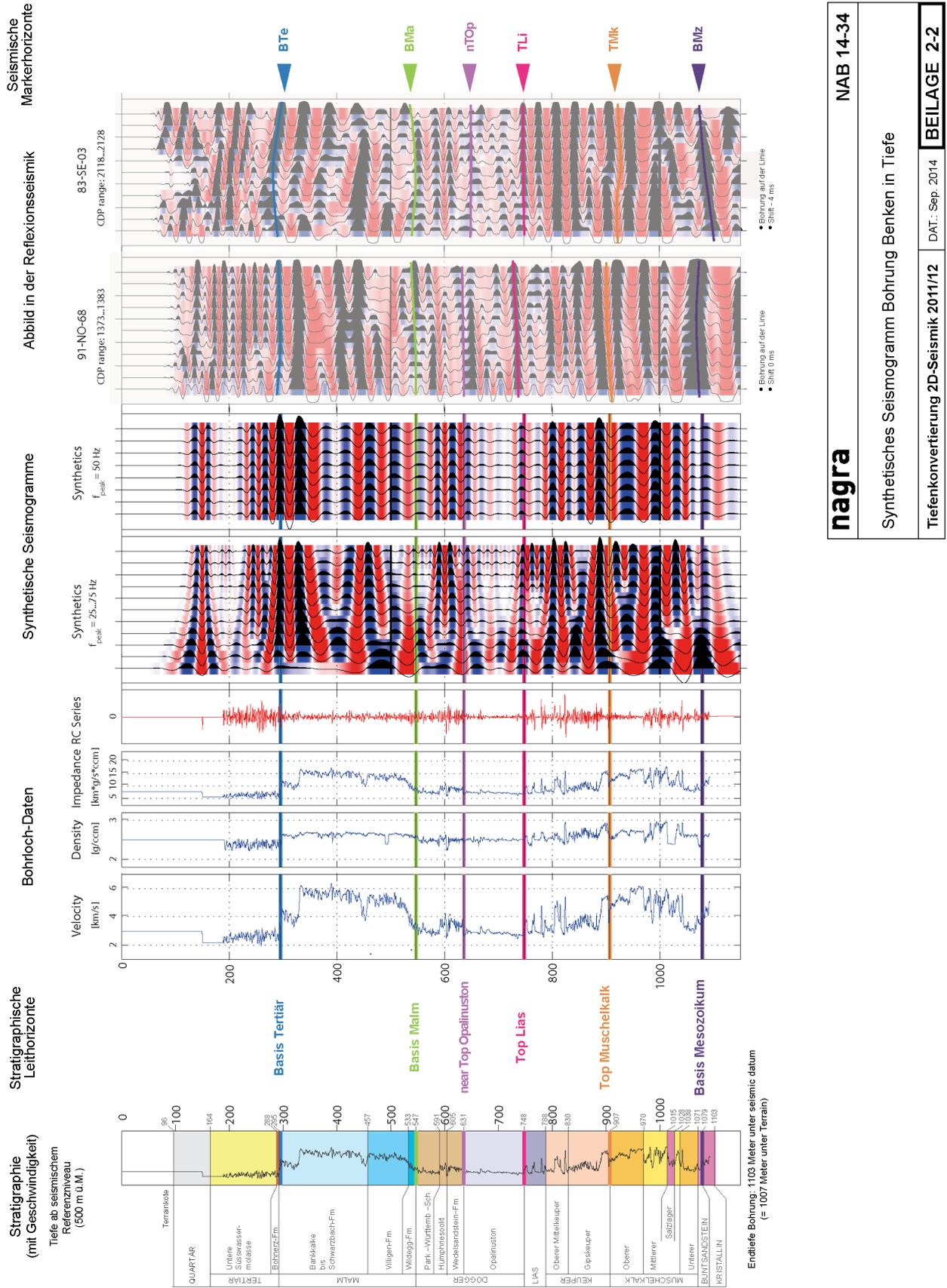


Figure 6-5: Synthetic seismogram from Benken-1 well in depth. From NAB 14-34, Beilage 2-2.

	Bohrung	Profil	Linien-Offset [m]	Shift [ms]	BMz	TMk	TLi	BMa	BTe
1	Weiach	82-NS-70	0	20	trough	trough	peak	zero-+	peak
		91-NO-75	0	8	trough	trough	peak	zero-+	peak
2	Riniken	82-NS-70	17	0	trough	trough	peak	peak	
		82-NF-30	63	0	trough	trough	peak	peak	
3	Schafisheim	83-SE-07	65	0	peak	trough	peak	zero+-	peak
		82-NF-10	65	8	peak	trough	peak	zero+-	peak
		83-NS-22	79	12	peak	trough	peak	zero+-	peak
		82-NS-20	81	8	peak	trough	peak	zero+-	peak
4	Lindau-1	79-SE-46	21	0	peak	peak	peak	zero-+	peak
		84-SE-05	125	0	peak	peak	peak	zero-+	peak
5	Leuggern	82-NF-50	64	0	peak				
6	Böttstein	82-NX-40	77	0	zero-+	trough			
		82-NF-50	26	0	zero-+	trough			
7	Pfaffnau-1	83-NF-02	40	8	peak	peak	peak	peak	peak
8	Benken	91-NO-68	109	8	peak	trough	peak	zero-+	peak
		83-SE-03	52	0	peak	trough	peak	zero-+	peak
9	Siblingen	91-NO-68	380	0	peak	zero-+			

Table 6-3: Well list with convention for picking of the seismic horizons. Wells are tied to old re-processed seismic lines. BMz = Base Mesozoic; TMk = Top Muschelkalk, TLi = Top Liassic, BMa = Base Malm; BTe = Base Tertiary. From NAB 13-10, Tab. 2.

As general remark (especially in reports – *Text und Beilagen*- NAB 13-10 and 14-34): the well names are not defined clearly in the reports and not referred exactly on the maps (Figures, *Beilagen*). Industry (oil or geothermal) well names have a number after the name (e.g. -1, -2) which informs on the number of wells at the same location. In Nagra's reports, the number has been added rarely only and not in a consistent way. As an example in Weiach there are two wells (-1, -2) and the number should be mentioned when referring to this well. The same remark is applicable for the Schlattigen wells. Although Sonnengarten-1 well is mentioned, it is however not described in the text.

Two wells discussed in the reports show imprecise data:

- In the *Beilagen* of reports NAB 13-10 and 14-34, Nagra presents Pfaffnau-1 well with Permo-Carboniferous sediments. When reconsidering the analyses of the samples of the well, Matter et al. (1987) mentions that the Permo-Carboniferous unit is not present in the well. The latter unit corresponds to Buntsandstein sediments. In a meeting (10.03.2015), Nagra mentioned that they know this paper, but they rather refer to other papers. Minutes of the 10.03.2015 meeting (ENSI 33/426): „Die Angaben von Buchi wurden sowohl in der regionalen Kompilation von Kämpfe 1984 (Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Stuttgart) als auch der Kompilation von H. Naef in NAB 06-26 («Permo-carboniferous?») übernommen.“ However, report NAB 06-26 doesn't seem to mention it.
- The Schlattigen-1 well reaches the crystalline basement beneath the Permian sediments (circa 50m?). *Beilage* 6-17 of NAB 14-17 report shows a yellow circle for the Schlattigen-

1 drill hole (Figure 6-13), meaning presence of Permian sediments only despite drilled crystalline basement, which is an error. The circle should be filled by green color (*Perm + Kristallin* in the legend).

The depth values of the stratigraphic horizon in the wells are the only reliable and precise depth values that exist. The seismic tie to well gives a difference of +/- 20 m already at the well location. For example, the Near Top Opalinuston horizon is not well defined in the wells.

6.2.4 Depth conversion of seismic profiles

The NAB 14-34 report presents the PSDM version (PSDM depthing, *Pre-Stack Tiefenmigration*) of the seismic lines. The methodology used for the depth conversion and the velocity model is beyond the scope of this geological review and is evaluated by M. Riede and F. Wenzel (chapters 2 and 3).

The PSDM profiles should be compared to the PSTM version (Pre Stack Time Migration, *Pre Stack Zeitmigration*) or the DTConv version (Depth-Time conversion), which is considered as an end product (NAB 14-34, Nagra 2012a).

The PSDM version is presented in the Appendix 2 of NAB 14-34 report for each seismic line (reprocessed and new acquired surveys) at the 1:50'000 scale. For the new seismic survey, a comparison between the PSTM, DTconv, PSDM (included the velocity model) is presented in Appendix 1 of NAB 14-34 for each seismic line. Profiles are vertically exaggerated (not to scale).

The horizon seismic interpretation on the PSDM version of the seismic lines is taken from NAB 13-10 report. The seismic interpretation of the Near Top Opalinuston horizon is included in the PSDM version, which was not the case in the NAB 13-10 report. Almost all the faults that were interpreted on the PSTM version were transferred on the PSDM version. According to Nagra, the PSDM version shows a better image, so in my opinion a reinterpretation of some fault zones should have been done by Nagra. Few critical cases are discussed in the NAB 14-34 report. An assessment on these cases (e.g. Fig. 4.3, NAB 14-34) is given in chapter 6.3.5 which discuss the fault interpretation by Nagra.

6.2.5 Seismic maps

Structural maps at scale 1:100'000 in TWT for each seismic horizon are included in the NAB 13-10 report. Enlargements of the maps at 1:50'000 are presented for each geological siting region. Depthing structural maps for each seismic horizon are presented in report NAB 14-34 at 100'000 scale. These maps have not been evaluated in detail, but were useful for correlation and location of structures/faults.

6.3 Geological elements interpreted on seismic profiles

6.3.1 Seismic horizons

A general characterization of seismic horizons is difficult due to the change of the geological setting, of the sedimentological facies change and of the geophysical parameters of the lines. Interpretation has been made mostly in a careful way by the Nagra and Proseis AG team. Seismic horizons have been followed on seismic profiles in closed loops, starting from the wells (seismic tie to well, chapter 6.2.3).

Five major seismic horizons have been interpreted on all the seismic lines and both sets of seismic data (NAB 13-10): Base Tertiary (BT_e), Base Malm (B_{Ma}), Top Liassic (TL_i), Top Muschelkalk (TMK), Base Mesozoic (BM_z). In the NAB 14-34 report, the Near Top Opalinuston horizon is added (Figure 6-5).

In the first step of this evaluation (*Schritt 1*, NAB 13-10), I asked (22.11.2013 meeting, ENSI 33/332 minutes) why Nagra has not interpreted more seismic horizons, e.g. Top Triassic and Top Opalinuston? Nagra's answer was that "*The five seismically interpreted horizons included in the NAB 13-10 report (Figure 6-4) are those that were defined during the Stage 1 of Nagra's investigations and seismic interpretation. The choice of the interpreted seismic horizons was made on the quality of the reflectors and the lateral continuity rather than on the stratigraphic unit limits. These seismic horizons are named Base or Top of the concerned stratigraphic limit. Additionally more horizons are already picked in the computer work station on the seismic lines (Near Top Effinger Schichten, Near Top Opalinuston, ...). These horizons are labelled with the prefix "Near" due to the difficulty in picking the reflector.*" In a later meeting (7. November 2014, ENSI 33/410 minutes, discussion on the NAB 14-34 report), Nagra mentioned that the Near Top Opalinuston horizon quality is meant to be conceptual (see detail in chapter 6.3.2).

In the NAB 14-57 and 14-58 reports, additional seismic horizons have been presented in order to demonstrate the change of facies thickness (Effinger Schichten layer and Brauner Dogger layer) (Figure 6-6).

Base Tertiary, Base Malm /Top Dogger

No comments.

Near Top Opalinuston

This seismic horizon is very difficult to interpret, because it is a non-reflective horizon. The Opalinuston layer is a clay rich horizon, which will appear as a transparent unit (non-reflective facies). The lateral continuity is not visible on seismic lines. The Opalinuston bed thickness is based mainly on the wells, because it is too imprecise to calculate it from seismic interpretation.

Top Liassic /Base Opalinuston, Top Muschelkalk

No comment.

Base Mesozoic

This seismic horizon corresponds to the beginning of a new sedimentary cycle on top of the Paleozoic sediments or crystalline metamorphic rocks. This horizon is important for the geological context and especially also for the understanding of the Permo-Carboniferous through edges. As it is mentioned in the NAB 13-10 report, it is difficult to interpret reflections below Base Mesozoic horizon, because the presence of reflections does not mean the presence of Permo-Carboniferous sediments (e.g. discussion on Benken-1 well, Fig. 3-3, NAB 13-10).

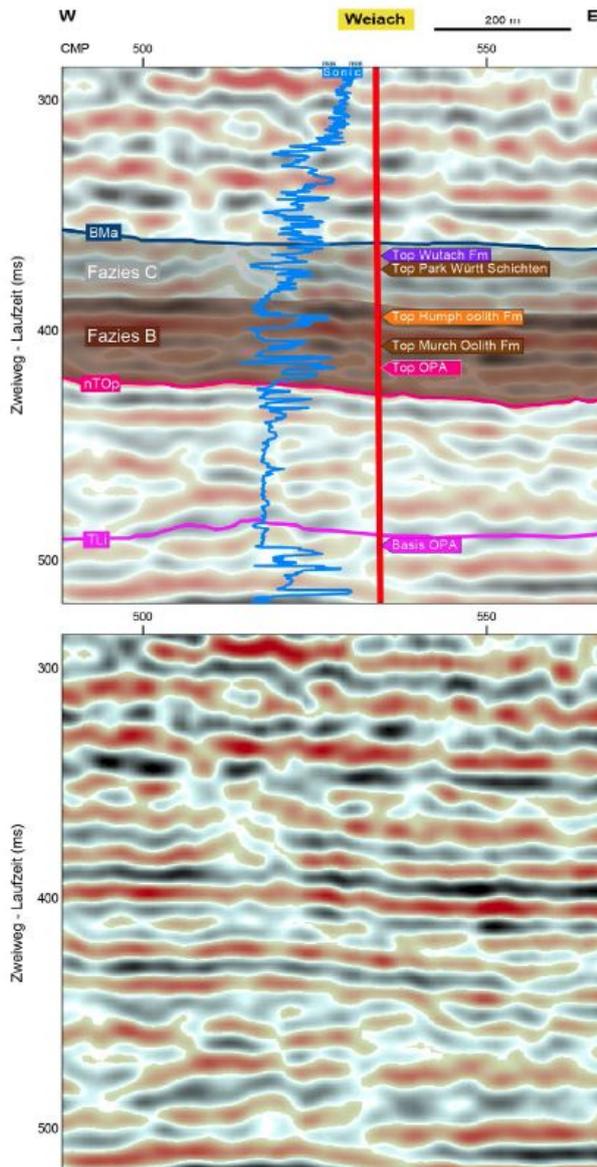


Figure 6-6: Additionally seismic horizon interpretation in Weiach-1 well for the “Brauner Dogger”. Comparison of the sonic log with the seismic line 91-NO-75. From NAB 14-58, Fig. 8.

6.3.2 Classification of the reflection quality of interpreted seismic horizons

A classification of the reflector quality (Table 6-4, Figure 6-7) has been established by Nagra in comparison to the one from Sommaruga et al. (2012). It depends on the quality of the reflectors and on the certainty of the interpretation (lateral continuity of the reflector, tectonic setting, ...). The quality class of seismic horizon is interpreted in the NAB 13-10 report, but it has not been applied to the depth converted version (PSDM) in report NAB 14-34.

Three quality classes of the seismic horizons were assigned (1 – *gut definiert*-, 2 – *ausreichend definiert*-, 3 – *schlecht definiert/konzeptionell*-). The quality was evaluated by Nagra-Proseis AG team on the strength and the lateral continuity of the seismic reflection, correlation with geological outcrops and on the confidence in the interpretation of a specific seismic reflector. This may explain why in some cases low strength and lateral continuity reflections could be assigned in class

2 or 1. This issue has been discussed with the Nagra –Proseis AG team at the 22.11.2013 meeting.

Reflexionsqualität	Interpretationsgewissheit	Qualität des interpretierten Markerhorizonts	Klasse	Situationsbeispiel
sehr gut	gross	gut definiert	1	sehr deutliche & kontinuierliche Reflexionen in nur geringfügig tektonisch beanspruchtem Bereich und/oder nahe einer Tiefbohrung bzw. geologischen Aufschlüssen
sehr gut	gering	ausreichend gut definiert	2	sehr deutliche & kontinuierliche Reflexionen in tektonisch stark beanspruchtem Bereich abseits von Tiefbohrungen bzw. geologischen Aufschlüssen
gut	gross	ausreichend gut definiert	2	deutliche & weitgehend kontinuierliche Reflexionen in nur geringfügig tektonisch beanspruchtem Bereich und/oder nahe einer Tiefbohrung bzw. geologischen Aufschlüssen
gut	gering	schlecht definiert	3	deutliche & weitgehend kontinuierliche Reflexionen in tektonisch stark beanspruchtem Bereich abseits von Tiefbohrungen bzw. geologischen Aufschlüssen
schlecht	gross	ausreichend gut definiert	2	undeutliche & wenig kontinuierliche Reflexionen in nur geringfügig tektonisch beanspruchtem Bereich und/oder nahe einer Tiefbohrung bzw. geologischen Aufschlüssen
schlecht	gering	konzeptionell	3	undeutliche & wenig kontinuierliche Reflexionen in tektonisch stärker beanspruchtem Bereich abseits von Tiefbohrungen bzw. geologischen Aufschlüssen

Table 6-4 : Classification of the reflection quality on the interpreted seismic horizons. From NAB 13-10.

The quality class attributions by Nagra-Proseis AG team together to horizons in report NAB 13-10 is mostly logic, but in some cases it could be reconsidered and given a higher class number (lower quality). The Base Mesozoic horizon (BMz) is often represented by a class 1 quality horizon (*„gut definiert Qualität des interpretierten Markerhorizonts“*); class 2 or 3 would be more appropriate for the strength of the reflection. I suppose the confidence of the interpreter knowing the geological context has pushed to attribute a better class. It would have been more appropriate to remain conservative.

Near Top Opalinuston horizon is not included in the NAB 13-10 report and therefore no quality class are attributed to it. It is very difficult to map it, and sometimes impossible. As has been discussed in the 10. March 2015 meeting, Nagra mentioned that this horizon is conceptual. From the minutes (ENSI 33/430) of the meeting: *„[Die Nagra] hält abschliessend fest: Wäre der Hilfs-horizont nTop in der Zeitinterpretation (NAB 13-10) dargestellt worden, wäre er als gepunktete Linie, sprich konzeptionell, eingezeichnet worden“*. In my opinion, Nagra should have done the exercise to interpret the Near Top Opalinuston horizon on the PSTM version for consistency reason. I agree that in many places the quality class of this seismic horizon would be conceptual, but

certainly not everywhere (e.g. on the seismic line 11-NS-16, CMP 5150-4950). If Nagra's comment is justified, it brings the question on the confidence in mapping the Near Top Opalinuston horizon and the depth of this horizon.

Qualitätsklassifizierung Markerhorizonte	Qualitätsklassifizierung Störungen
———— gut definiert	———— robust
- - - - - ausreichend definiert	- - - - - ungewiss
..... schlecht definiert / konzeptionell konzeptionell

Figure 6-7: Description of the quality classes of the seismic horizons (on the left) and faults (on the right) as shown on the seismic lines. From NAB 13-10, Fig. 3-2.

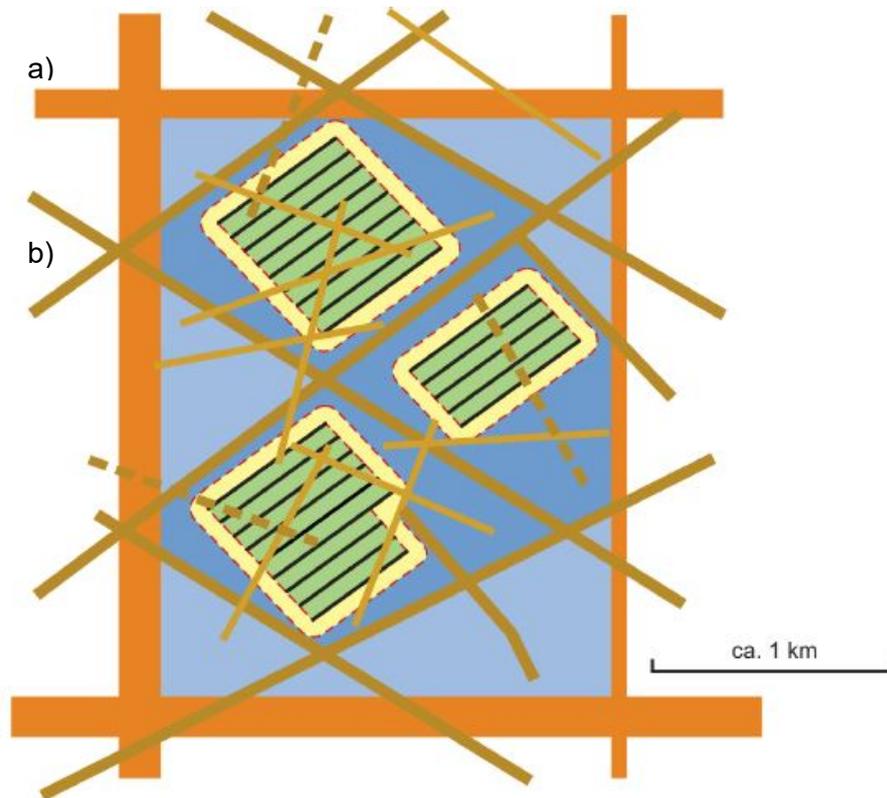
6.3.3 Fault definition

The identification of the geological faults is one of the important parts of the 2D-seismic interpretation work. The following explanations are based on the NAB 13-10 report.

On the seismic profiles, faults with a vertical offset > 10 ms in TWT displacing a stack of reflection were interpreted by Nagra-Proseis team. Considering a high average seismic velocity (4000 m/s for Jura Südfuss siting region in Table 4 from NAB 13-10) between the Base Malm –Top Liassic interval, the 10 ms offset corresponds to a vertical displacement of circa 25 +/- 10 meters. Vertical offsets < 10 ms were not systematically interpreted, because in many cases it was not clear if the feature was a real geological structure or a seismic processing artefact. The resolution of 2D-seismic lines within the Opalinuston unit is close to 20 m. This minimum has been critical in the elaboration of the fault element classification (Figure 6-8). Fault offsets > 20 m within a 50 – 100 m thick geological unit (e.g. Opalinuston) planned as a radioactive waste host rock, are considered problematic for a repository. See also discussion in chapter 6.3.4.

Nagra's concept on faults is related to the relevance of the faults within a geological siting repository. This concept has been developed with civil engineers, taking into account mechanical problems of the rocks (*Wirtgesteine* and *Rahmengesteine*) within the repository and has resulted in a classification with different types of geological elements (Figure 6-8, Figure 6-9). Two of them are fundamental for this review (see also description of point a) and b) in the Figure 6-8):

- a) Geological elements defining siting region boundaries including **regional faults** (*regionale Störungen*) and tectonic zones to be avoided (*zu meidende tektonische Zonen*)
- b) Geological elements defining layout of disposal area including **layout-determining geological elements** (*anordnungsbestimmende Störungen*).



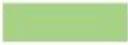
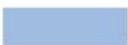
Symbol	Description	Significance
	a) area-defining geological elements	defining siting region
	b) layout-determining geological elements	defining usable disposal zone and layout of disposal area
	emplacement-determining geological elements	defining emplacement within the disposal room area
	small scale geological elements	taken into account during safety analysis
	disposal room	–
	disposal room area	–
	disposal area	–
	usable disposal zone	–
	non-usable disposal zone	–

Figure 6-8: Classification of geological/tectonic elements and their relevance concerning the layout of a geological repository at depth (modified from NAB 14-88, Fig. 2-1). a) Area-defining geological elements = regional faults (*regionale Störungen*); b) layout-determining geological elements = layout-determining faults (*anordnungsbestimmende Störungen*).

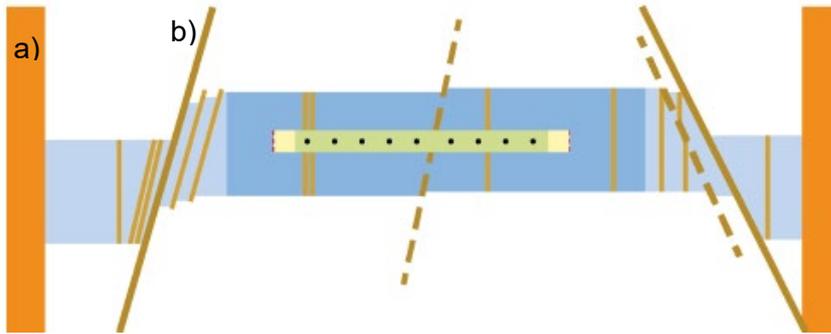


Figure 6-9 : Cross-section view of geological/tectonic elements and their relevance concerning the layout of a geological repository at depth (see Figure 6-8 for legend). Modified from NAB 14-88, Fig.2-2.

Additionally, the following type of faults or zones have been presented by Nagra during the 22. November 2013 meeting (see minutes ENSI 33/332):

Regional fault area (regionale Störungszone)

This area is determined by faults which have been interpreted on several seismic profiles and have a km long lateral extension. It limits small-scale fault areas. The regional faults are taken from the seismic interpretation in the NAB 13-10 report. Minimal displacement of these faults is circa 20 m (see above). These regional faults (thrust or normal faults) have been mapped by Nagra and are shown in red on the general map of Figure 6-10.

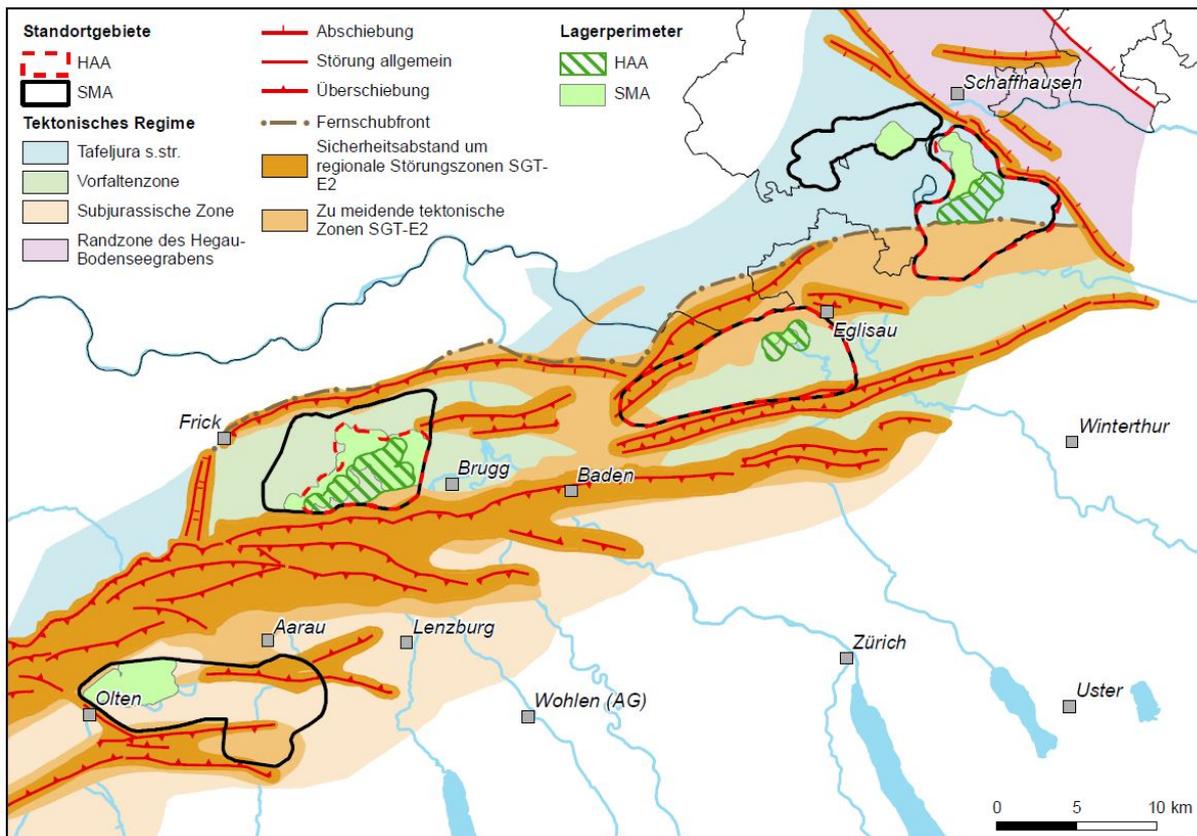


Figure 6-10: Location map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided (zu meidende tektonische Zonen) in northern Switzerland. From NAB 14-01, Fig. 4.4-1.

Tectonic zones to be avoided (zu meidende tektonische Zonen)

These zones were introduced in the Stage 2 (SGT – E2) by Nagra in order to refine or optimize the potential siting area in the underground for the nuclear waste repository (*Lagerperimeter*). In Stage 2 (SGT - E2) Nagra has to exclude areas, not suitable for the construction of a repository (Figure 6-10). These zones have been defined on the presence of faults or folds, which show indications of late Cenozoic reactivation. The limit of these zones is based on the seismic interpretation of the profiles. The NAB 13-10 report is considered by Nagra as a *Rohdaten* report for this issue.

These important zones used by Nagra to refine the repository perimeter are regrettably not mapped on the seismic location maps showing CMP (see chapter 6.2.1 and 6.4) neither on the seismic profiles of the NAB 13-10 or NAB 14-34 reports.

Layout-determining faults (anordnungsbestimmende Störungen)

These faults are defined by Nagra from an engineering perspective, where the vertical offset is close to the limit of the 2D-seismic resolution (>20 m). No correlation from one seismic line to another can be made. This type of faults has been interpreted on one seismic line only, as local structure and does not have a clear geological extent over a long distance. These faults are from the interpretation of the NAB 13-10 report. This type of faults will be considered more carefully in Stage 3 (SGT – E3) with the availability of 3D-seismic surveys. They are not used to define the limits of the repository of the geological siting region. The concept of the LDF faults has been discussed in the NAB 14-88 report (Simulation of layout-determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for sub-surface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland). They are almost not discussed in the other reports, making it difficult to assess them.

Small-scale geological elements

Small-scale geological elements have a vertical offset <20 m. These small elements are considered during the safety analysis (Figure 6-8). Faults and folds that are best defined as being of second-order importance for SGT – E2 have not been marked on the interpreted sections.

It is important to note, that faults showing smaller vertical offsets (small-scale faults) may also be relevant for *Lagerperimeter* of the repository for other reasons (hydrogeology, long-term safety etc.). In NAB 14-88 report, it is mentioned that in an assessment of space reserves at depth from an engineering perspective, these kinds of small-scale tectonic faults and associated issues are not addressed.

In my opinion, layout-determining faults, small-scale elements and their geological meaning have to be analyzed carefully during Stage 3 (SGT - E3). In Stage 2 (SGT – E2), it is difficult to assess these mentioned elements because they were not really discussed by Nagra in the reports.

6.3.4 Classification of seismically interpreted faults

The classification of quality for the interpreted faults (Figure 6-7) is similar to that proposed for the seismic horizons (see also Sommaruga et al. 2012). The class quality of faults is interpreted in the NAB 13-10 report, but it has not been done on the depth converted version (PSDM) in report NAB 14-34.

Three quality classes were assigned (1 - *robust*, 2 - *ungewiss*, 3 - *konzeptionell*) (Table 6-5, Figure 6-7). The quality was evaluated on the offset of reflection and the reflection related quality class.

Beurteilungskriterium	Beurteilung der Störungsinterpretation	Klasse
Verstellung eines seismischen Markerhorizonts der Qualitätsklasse 1 oder 2	robust	1
Verstellung eines seismischen Markerhorizonts der Qualitätsklasse 3	ungewiss	2
Basierend auf regionalgeologischen Konzepten oder aufgrund der Verstellung eines Markerhorizonts der Qualitätsklasse 4	konzeptionell	3
Gemäss in geologischen Karten publiziertem Oberflächenaufschluss	geologisch beobachtet	1

Table 6-5 : Description of the quality classes of the seismically determined faults (as shown on the seismic lines). From NAB 13-10, Tab. 5.

In the NAB 13-10 report, there is no description of the correlation on the maps between fault quality classes. It would have been interesting to add a symbol for the faults on the seismic horizon TWT maps (which are included in the *Beilagen* of the NAB 13-10 report), which illustrates the class quality of the faults (similar to Figure 6-7). A single fault could have a different seismic expression from one line to another. Therefore, it is not necessary to correlate the same quality class for a single fault (lateral variation), but at least this information should be shown on the map.

6.3.5 Interpretation of faults by Nagra

In the 22. November 2013 meeting (ENSI 33/332 minutes), the experts discussed the interpretation of the faults on the seismic lines and also asked the Nagra - Proseis AG collaborators why some rather obvious faults on the seismic profiles had not been interpreted. The answer was that these faults were usually part of broad fault zones (regional fault zones), which would not be considered as potential nuclear waste repository in the SGT - E2. For consistency reasons, Nagra should have interpreted also these faults.

In the NAB 14-34 report (chapter "4.1.1 Übertragung und Anpassung der Zeitinterpretation"), Nagra discusses the transfer of the interpretation from the PSTM/DTConv seismic line version to the PSDM (depth converted) version. Almost all the faults that were interpreted in the NAB 13-10 report were kept. As an example, they show the seismic line 11-NS-04 (Fig. 4-3, NAB 14-34). On the PSTM version from NAB 13-10, no real offset was shown for this line. Nagra, in its report, writes that the PSDM version shows a better image, and in this case, we have continuous reflections. Therefore, it would have been more comprehensible to remove the fault. Nagra's answer to my comments (see minutes ENSI 33/426) during the meeting of the 10. March 2015 in Proseis AG office:

„Laut Nagra wurden generell die Brüche aus den Profilen der PSTM in den Profilen der PSDM und DTconv beibehalten. Es gibt jedoch einige Ausnahmen wie z.B. in Seismiklinie 11-NS-16 bei CMP 4200. Die Nagra hält fest, dass grundsätzlich die Interpretation aus der PSTM beibehalten wurde und, wo dies nicht der Fall ist, die Änderungen im Bericht NAB 14-34 vermerkt wurden. Für die Betrachtung bittet die Nagra alle Versionen (PSTM, PSDM und DTconv) zu nutzen. Bei Unklarheiten betreffend Störungen wird die Nagra auf Rückfrage klar Position beziehen, welche Interpretation relevant ist.“

Although a small number of faults are not included on the maps and some minor faults are not marked on the interpreted 2D-seismic sections, Nagra emphasized that these features would be considered during the development of regional tectonic and dynamic models. In the Stage 3 (SGT – E3), based on 3D-seismic data, Nagra will reconsider these faults and reassess them. To avoid discussions and misunderstanding for the experts and for reasons of “Nachvollziehbarkeit”, it would have been clearer to interpret all the faults (major and minor) on the 2D-seismic data and mark them on the horizon maps.

The maximum length of a fault that could be missed in Nagra’s maps is determined by the space between the seismic lines. The maximal distance between two neighbor and parallel seismic lines depends on the profile coverage for a considered area.

The interpretation of the Base Mesozoic horizon beneath the Jura main décollement zone has not been done accurately. This topic has been debated in the 10 March 2015 meeting in Proseis AG office. Below an excerpt from the minutes (ENSI 33/426) is shown.

Question III.3: “Beneath the main Jura thrust, we observe in your interpretation on the PSDM Version a sag structure for the Base Mesozoic horizon. This sag structure is due to a velocity problem under the Jura anticline and is not a real structure in my opinion (e.g. line 11-NS-16 in Fig. 4-4, NAB 14-34). On the TWT version, the interpretation should follow the reflections, which often shift upwards under the “anticline”. This change in interpretation on the TWT version would result in a different image on the depth-converted version. Did you consider to go back to change the interpretation for this horizon?”

„Die Nagra erläutert, dass sie dieses Phänomen detailliert analysiert und im Bericht NAB 14-34 adressiert und diskutiert hat (siehe Beilage 2). A. Sommaruga betont, dass der von ihr beobachtete Effekt in mehreren Profilen mit der Jura-Hauptüberschiebung zu sehen ist. Die Nagra hält den Vorschlag von A. Sommaruga die Interpretation in Zeit nachträglich zu ändern, um diesem Phänomen entgegen zu wirken, letztendlich für nicht sinnvoll (auch aus Transparenzgründen). Viel eher schiene es ihr sinnvoll, dass das der Tiefenkonversion zugrundeliegende Geschwindigkeitsmodell auf Basis einer z.B. durch Bilanzierung verifizierten Strukturinterpretation (siehe NAB 14-105) geologisch zu plausibilisieren und die Tiefenkonversion anschliessend noch mal durchzuführen wäre. Für SGT - E2, in welcher derartig grosse Störungszonen grossräumig abgegrenzt werden, erscheint ihr ein derartig iteratives Vorgehen aber nicht stufengerecht.“

According to me, this iterative exercise would have been useful in order to constrain better the geological/balanced cross-sections.

Some complex faulted and/or folded zones identified on the seismic sections could be interpreted in terms of different structural models. The Stadel-Irchel anticline is a very good example of these zones. Two alternative models are well illustrated and discussed by Nagra in NAB 13-10 on Fig. 6-3 (see also discussion in chapter 6.4.3). This type of presentation and discussion could have been applied for other structures e.g. Born anticline (see also discussion in chapter 6.4.5).

6.3.6 Geological structures

Four geological siting regions are located in the Molasse basin and the Jura foreland fold-and-thrust belt (Figure 6-11). A fifth geological siting region, Südranden, is located entirely in the Tabular Jura, north of the seismic front of the Jura deformed zone. Structural elements seen on the seismic lines are folds, thrust faults, reverse faults, normal faults and structures associated to these elements.

Anticlines and lineaments

Identification of the anticlines and lineaments (the latter term is used by Nagra, but not clearly defined) in northern Switzerland has already started in Stage 1 (SGT - E1) and has further been investigated in details in Stage 2. Thanks to the new acquired and the old reprocessed 2D-seismic data, faults could be correlated laterally with more confidence. Nagra has given local names to anticlines and lineaments, which are seen in the Figure 6-12. Some of these structures are discussed in Chapter 6.4, where specific seismic profiles are discussed. The Schönenwerd-Eppenwerd anticline is a structure newly identified in Stage 2.

Since Nagra's work, the seismically mapped front of the Jura décollement has been moved north to include the "Vorfaltenzone" into the Jura deformation zone (Figure 6-11). Geological siting regions (*Standortgebiete*) are located south of the Jura front deformation, except Südranden and the northern part of Zürich Nordost siting regions. According to several studies in northern Switzerland (Mosar 1999, Madritsch et al. 2008, Madritsch et al. 2010, Ustaszewski et al. 2007), deformation and tectonic activity along the main Jura thrust were present until recently (2 Mio years) in the Mesozoic cover and also in the basement (inversion of Permo-Carboniferous trough?).

Several fault orientations exist in northern Switzerland: NW-SE, WSW-ENE, NS. They have different period of activity and different types of movements (compression, extension and transtension. For the major faults, an important component of transtension should not be neglected in addition to normal movement (see also Dooley & Schreurs, 2012).

Permo-Carboniferous troughs

Deep drilling in northern Switzerland by Nagra has proven the presence of Permo-Carboniferous troughs and opened the discussion on this topic (Matter et al. 1987). Permian and Carboniferous sediments were identified only in the Weiach-1 well (Matter et al. 1988) and in the Weiach-2 well (Forest Oil – SEAG, Reinicke 2011); some other deep wells reach the Permian sediments only and/or crystalline rocks (Figure 6-13). The identification of the troughs on the new acquired 2D-seismic data or on the old reprocessed seismic lines remains challenging because the reflections below the Base Mesozoic horizon are discontinuous and of low amplitude. The location of the Permo-Carboniferous troughs (NAB 14-17) is also based on the new gravity map of northern Switzerland (Green et al. 2013). The interpretation of the Pre-Mesozoic units is based on seismic facies correlation and discordances between reflection stacks. Three seismic facies were recognized by Nagra in the *Zentraler Permokarbondrog* especially in the Jura Ost geological siting area. From older to younger: the *Untere Trog* filling (UT) which consists of the Carboniferous sediments with high amplitude series continuous on short distances; the *Mittlere Trog* (MT) filling, which is a thick series (>1s TWT, about > 2 km) with numerous discordances and waved reflections; the *Obere Trog* filling (OT) beneath the Mesozoic units with parallel to sub-parallel reflections up to Base Mesozoic horizon.



Figure 6-11 : Tectonic map of northern Switzerland. Additionally dashed thick red line corresponds to the Jura main thrust. Dashed thick blue line corresponds to the front of the Jura deformation taken from seismic lines. Modified from NTB 14-02, Beilage 4-1.

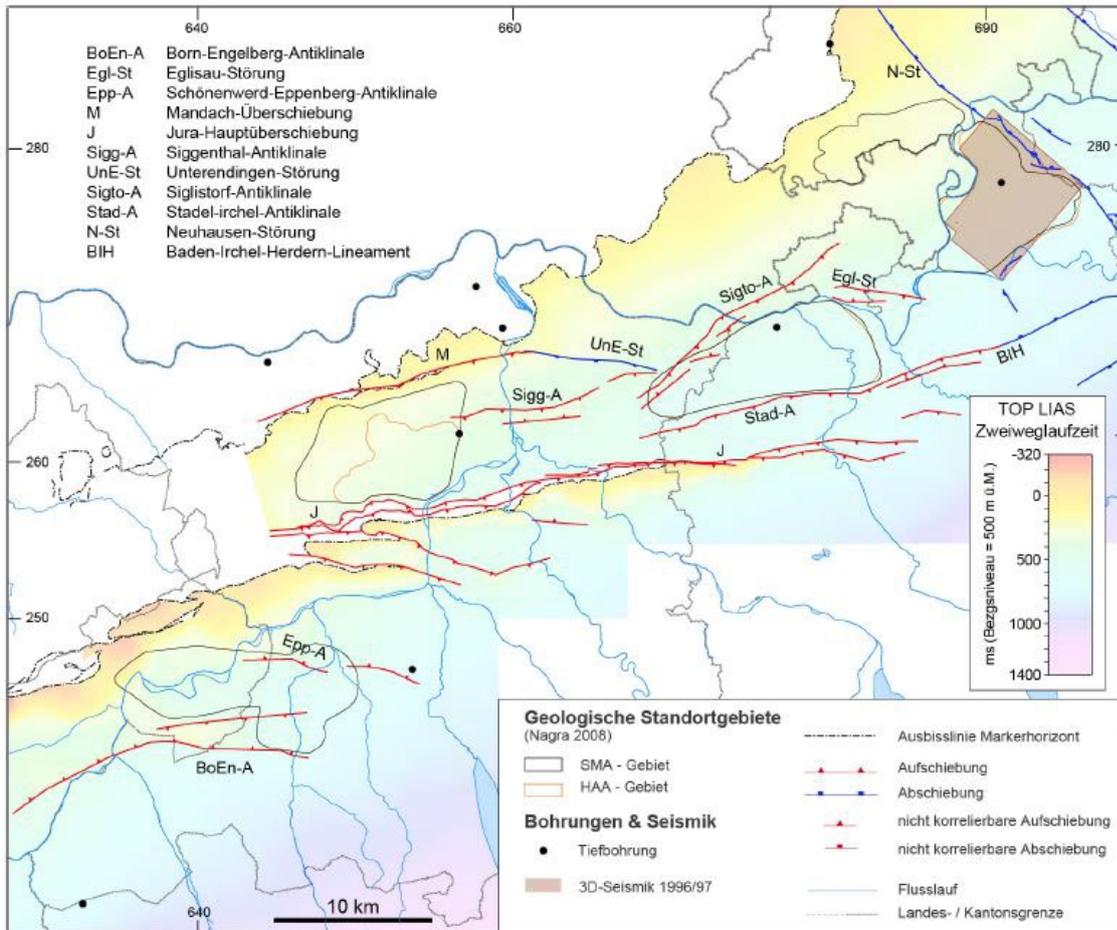


Figure 6-12 : Location of regional faults and related structures across the Top Liassic horizon TWT map. From NAB 13-10, Fig. 6-1.

Interpretation and understanding of the grabens in the NAB 14-17 has been improved based on models (Burg et al. 1994) and results from the 2D- and 3D- surveys (Marchant et al. 2005). Major faults bounding the half-grabens are distinguishable (can be deduced), but many minor faults are not clearly identifiable and remain conceptual or speculative. In my opinion, faults in the basement could be faults, which are potentially active (recent tectonics). The risk of reactivation of these faults has to be evaluated and discussed by Nagra in more details also considering the displacement of the Mesozoic cover above the main décollement level in Triassic layers.

Interpretation of the seismic lines in the Pre-Mesozoic units has been done mainly by one author (H. Naef), which gives consistency to the interpretation of the seismic facies. Given the low quality of the seismic reflections in this domain, this leads the interpreter to a large part of subjectivity. Therefore, the question arises if another author would obtain the same results.

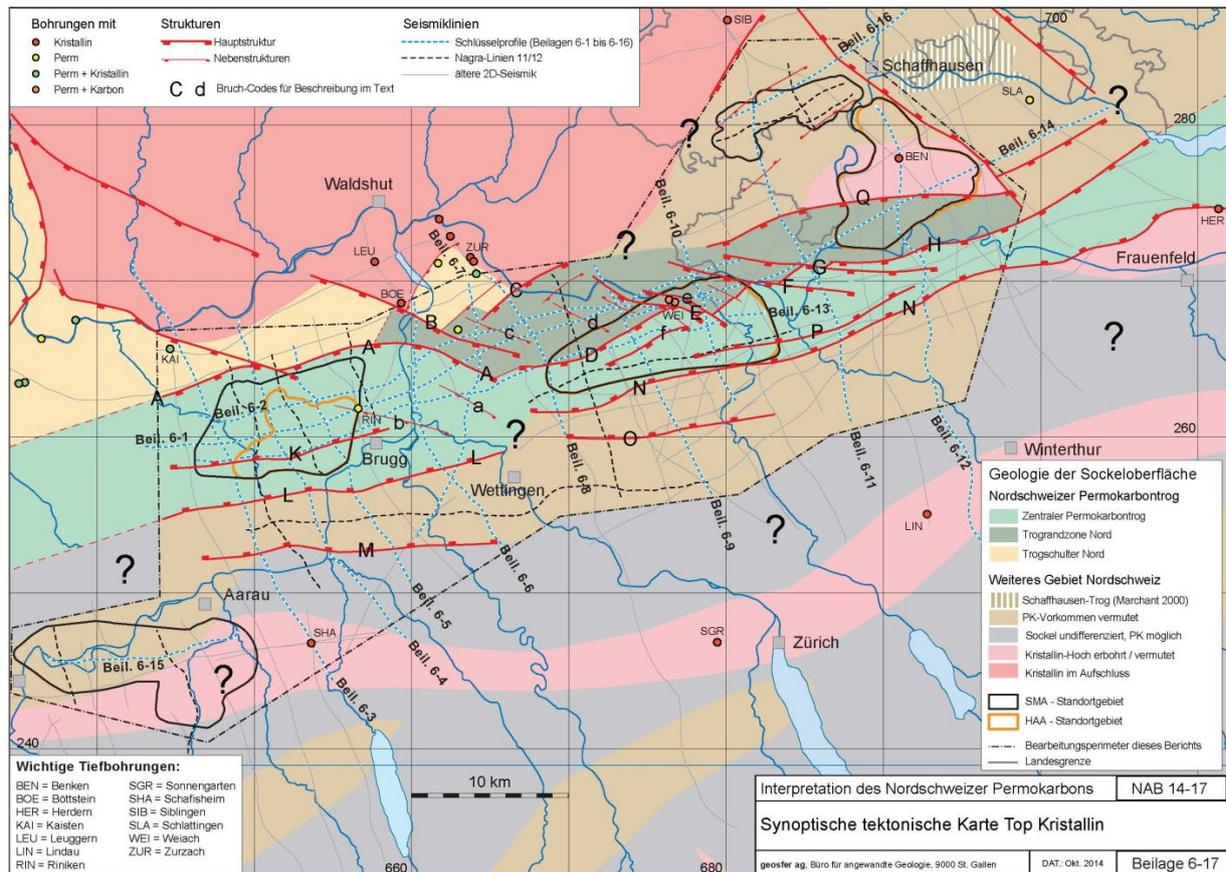


Figure 6-13: Location of the Permo-Carboniferous troughs and the crystalline basement as interpreted in the NAB 14-17 report (Beilage 6-17). For remarks on wells, see also chapter 6.2.3 well data)

Flexures

On several of Nagra's maps included also in this report (Figure 6-11, Figure 6-15, Figure 6-19, Figure 6-22, Figure 6-24), *Flexur* (a line with symbol) has been mapped. This term has not been discussed in the recent reports (see *Frage 63* in NAB 17-01), but in previously published reports (NTB 00-03). According to Nagra (see *Frage 28* in NAB 17-01), the location of the flexures is one criterion to determine and delimitate the tectonic zones to be avoided. Not finding enough information in the recent reports, on the interpretation of flexures and how Nagra located and mapped them, several questions have been addressed to Nagra (*Frage 63* in NAB 17-01).

Nagra's geometrical interpretation of a flexure is given in the answer of *Frage 63* (NAB 17-01):

"A Flexur is characterized by an s-shape deformation of sediment layers / reflection packages without visible brittle faulting that is caused by vertical (and/or horizontal) movements of underlying tectonic blocks (see Murawski & Meier 1998)."

As part of its definition, a flexure presents two axial surfaces. The question arises what part of the flexure does the mapped line represent (e.g. Fig. 4.4-4 and Fig. 4.4-5, NTB 14-02 Dossier II). Nagra's answer is (see *Frage 63* in Appendices):

The "Flexur" symbols shown in the mentioned figures/maps do not represent the precise traces of flexures (e.g. the "Flexur-Achse" in the sense of Murawski & Meier (1998) which is the line that follows the hinge of the bended layers) but have an illustrative character to roughly show the flexure's along-strike orientation (similar to the shown red traces of regional fault zones; compare answer to ENSI question 35). The polygons marking flexure – related "Tektonisch zu meidende

Zonen" (see Fig. 4.4.1 and polygon outlines in Figs. 4.4.4, 4.4.5 & 4.4.6) cover the entire bended/flexured sediment package.

From my point of view, and in order to have a better comprehension of this topic (*Nachvollziehbarkeit*), flexures and their axial surfaces should first have been interpreted clearly on each seismic profile (only part of them are illustrated, see Figure 6-20, where the word *Flexur* in red has been added by the reviewer). Then, Nagra should have illustrated them precisely on the maps as a trace (there are two axial surface traces in a flexure) for each seismic horizon. The location of the axial surface trace changes from one seismic horizon to another. In that case, we would have had a precise limit of the flexure and a clear lateral correlation. Therefore, the maps shown in the NTB 14-02 (e.g. Fig. 4.4.-4 and others) are too synthetic.

Nagra's answer to further questions from ENSI (*Frage 63* in NAB 17-01) is as follow:

"It is correctly noted by the reviewer that the location of flexures is a key criterion to delimit the tectonic zones to be avoided. In our earlier reply to the reviewer's initial sub-question number 3 (see above) we did not state that the mapping of these flexures is only rough. What was stated is that the symbol used in the addressed NTB figures only roughly sketches the flexures along the strike orientation. As was explained, it is the shown polygon outlines that delimit the tectonic zones to be avoided, e.g. the flexure zones.

The question raised by the reviewer is still rectified to some extent as the precision of this delimitation is of course affected by uncertainties, in this case stemming from the seismic data density but also the structural geological mapping approach/concept (e.g. expert view). The sensitivity /significance of this uncertainty for the size of the potential disposal perimeters in the various siting regions but in particular Nördlich Lägern was tested in the course of Nagra's evaluation."

6.4 Discussion of geological features on seismic profiles in defined geological siting region

For the five geological siting areas, ENSI has formulated questions on specific seismic lines (chapter 6.1.2.3). For each siting region (*Standortgebiet*), we propose a table with the main seismic lines and the related *Beilagen/Anhänge*/Figures included in reports and the questions addressed by ENSI. Discussion is based on Nagra's figures (maps and seismic interpreted lines) to which minor modifications (explained in the caption) have been made.

The general recommendation of ENSI for this part of the review is as follows: *„Generell soll bei der Beurteilung der Fokus auf denjenigen Profil-Sektionen liegen, welche einerseits im Standortgebiet liegen oder einen Einfluss auf das Standortgebiet haben, andererseits die Ergebnisse der Einengung konservativ in Frage stellen konnten. Ist das Inventar an Störungen vollständig, oder mussten Anzeichen von potentiellen Störungen mitberücksichtigt werden (Konservativität)?“*

6.4.1 Südranden siting region

This geological siting region is located in the autochthonous Tabular Jura, NE of the Jura frontal thrust, and is in an extensional tectonic context. Three new seismic lines have been acquired, two strike lines and one dip line (Figure 6-15). No well is located in this siting region.

No regional fault is located in this geological siting region. The Neuhausen fault (Figure 6-12) is located to the eastern edge of the siting region and is visible only on the old reprocessed seismic

line (91-NO-79), in the absence of other data across this structure. No tectonic zone to be avoided is located in this siting region.

Line name	NAB 13-10, Beilage	NAB 14-34	NTB 14-02	NAB 14-17	Questions from ENSI
12-NS-66	Beilage 5-18	A2-1-18	A1-7	-	<i>Das ENSI wünscht sich für dieses Profil eine Aussage zur generellen Betrachtung von Multiplen im Grundgebirge.</i>
12-NS-75	Beilage 5-19	A2-1-19	A1-7	-	<i>Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.</i>
12-NS-77	Beilage 5-20	A2-1-20	Beilage 4-6, A1-7	-	<i>Das ENSI stellt sich die Frage, wie gut die Neuhauserwald-Rinne (CMP 4550 bis 4850) und damit einhergehende mögliche tektonische Störungen im Grundgebirge (Rand eines Permokarbon-Troges?) erkennbar sind.</i>
Additional lines					
91-NO-68	A-26	A2-2-26	Beilage 4-2, Beilage A1-8	Fig. 5-3	-
91-NO-79	A-32	A2-2-32		Beilage 6-16	-
84-NF-65	A-19	A2-2-19		Beilage 6-11	-

Table 6-6: Seismic lines and related enclosures (*Beilagen/Anhänge – A-*) in reports for the Südranden geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

12-NS-66

The interpretation of the Pre-Mesozoic units in the Südranden siting area is not trivial. Nagra did not interpret (in the NAB 14-17 report) in the SR siting region, the Pre-Mesozoic units on the new acquired seismic lines (Table 6-6). The relationships between reflections in the Pre-Mesozoic unit on the depth (PSDM) version of the 12-NS-66 seismic line (A 2-1-18 in NAB 14-34) look quite different from the TWT (PSTM) version (Beilage 5-18 in NAB 13-10). On the depth version, the reflections are sub-parallel resembling more to multiples. On the TWT version, reflections are discontinuous and not sub-parallel with possible internal onlaps. On the 84-NF-65 seismic line (parallel dip line located western), Nagra in collaboration with H. Naef suppose a Permo-Carboniferous through on the TWT version (Beilage 6-11 in NAB 14-17). Continuous parallel reflections close to the intersection with the 12-NS-77 strike line (but not visible on that line) resemble the ones in the *Obere Trogfüllung* unit. However, the presence of the Klettgau through remains difficult to assess.

12-NS-77

The interpretation of this strike seismic line presents three faults, probably layout-determining faults, at CMP 2550, 3750, 4650 across the Mesozoic layers. No clear offset of reflections, even of Base Mesozoic horizon can be seen. The last fault at CMP 4650 is not seen (no offset of reflections) on the intersecting dip seismic line 91-NO-68. On the PSDM version of the line 12-NS-77, which should be a better image, the reflections are wavy but continuous without offset. A slight thickening is visible in the Triassic unit. Northward, the interpretation on the parallel seismic line 91-NO-79 (Beilage 6-16 in NAB 14-17) does not show any fault. Reflections are continuous without offset. Accordingly, the presence of these faults is questionable.

ENSI questions the influence of the *Neuhauserwald-Rinne* or channel (NH in Figure 6-14) on the reflections within the Mesozoic or Pre-Mesozoic units and on the interpretation of the structures. This channel filled with quaternary sediments is located on top of the “last” fault (CMP 4650) discussed in the paragraph above. The channel is recognizable on the depth version (A2-1-20 in NAB 14-34). An influence of the channel on the data processing cannot be excluded. The reflections within the many Mesozoic layers are continuous even if they are wavy. No major structure can be observed. We cannot exclude a normal fault dipping toward East with a very small offset. This type of fault would be small-scale element, with no lateral correlation.

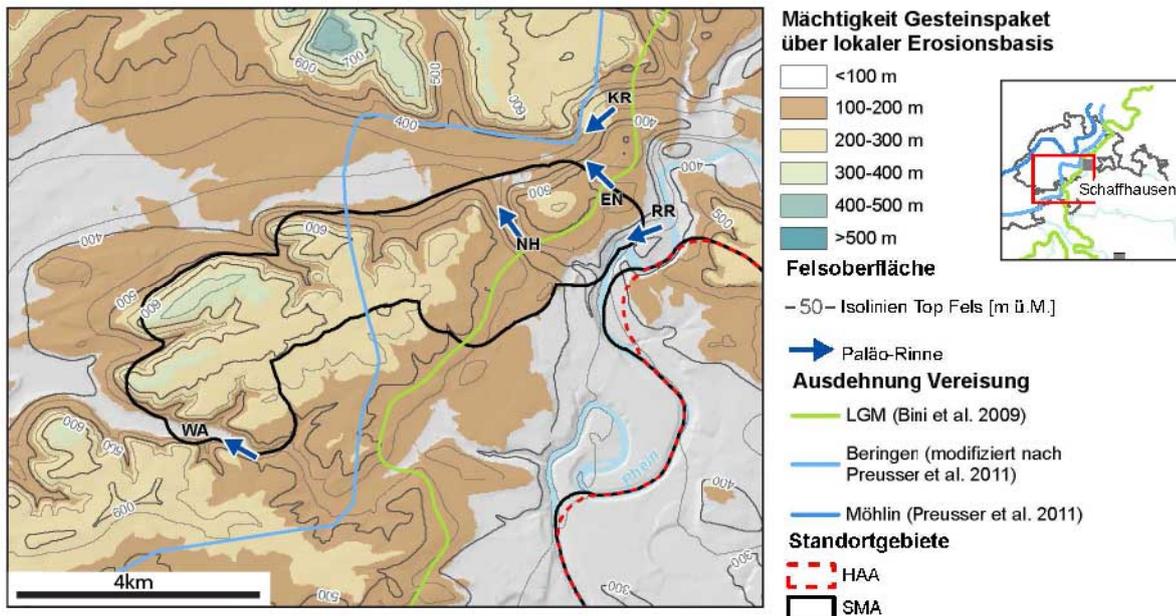


Figure 6-14: Topography and quaternary filled channels in the Südranden siting region. EN: Enge; KR: Klettgau-Rinne; NH: Neuhauserwald-Rinne; RR: Rheinfall-Rinne; WA: Wagental. From NTB14-02, Dossier III, Fig. 4.4-10.

6.4.2 Zürich Nordost siting region

The northern part of this geological siting region is located north of the Jura thrust front (Figure 6-11) in the autochthonous Tabular Jura. The southern part is located in the *Vorfaltenzone*, which is part of the detached Jura cover. The Benken-1 well, reaching crystalline rocks, is located in the center of this siting region.

No new seismic line (2011/2012) has been acquired in this siting region. Only reprocessed seismic lines were available in the reports. Some seismic lines are SEAG (named SE) seismic lines, which for confidential reasons are not included in the reports (NAB 13-10 and NAB 14-34). However, the possibility to consult the lines at Proseis AG office was offered (this has not been done

since 83-SE-03 seismic profile is included in the NAB 14-17 report) (Table 6-7). The seismic profiles have different vertical scales (TWT, depth) in the reports and Pre-Mesozoic units are not interpreted on each version.

Line name	NAB 13-10, Beilage (TWT)	NAB 14-34 (PSDM)	NTB 14-02 (Depth)	NAB 14-17 (TWT)	NAB 14-58 (TWT)	Questions from ENSI
91-NO-68	A-26, Fig. 3.3	A2-2-26	Beilage 4-2, Beilage A1-8	Fig. 5-3	Beilage 6, Fig.9	<i>Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.</i>
91-NO-77	A-31	A2-2-31	Beilage 4-7, Beilage A1-8			<i>Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen.</i>
Additional lines						
91-NO-75	A-30	A2-2-30	Beilage A1-8	Beilage 6-14		-
83-SE-03	-	-	Fig. 4.4-4	Beilage 6-12		-

Table 6-7: Seismic lines and related enclosures (*Beilagen/Anhänge – A-*) in reports for the Zürich Nordost geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

The Neuhausen fault (Figure 6-12, Figure 6-15) is the major regional fault delimiting the north-eastern part of the geological siting region. This normal fault has an offset ~70m (~50 ms) affecting all the seismic horizons (Base Mesozoic included) and is oriented NW-SE, parallel to major faults in the Schwarzwald basement. This fault was certainly active in the Tertiary time and most probably already during Mesozoic and Pre-Mesozoic times. Activity post-dating the main Jura phase of folding is not excluded (see discussion in NTB 14-02 Dossier II p.67 and Dossier III p.13).

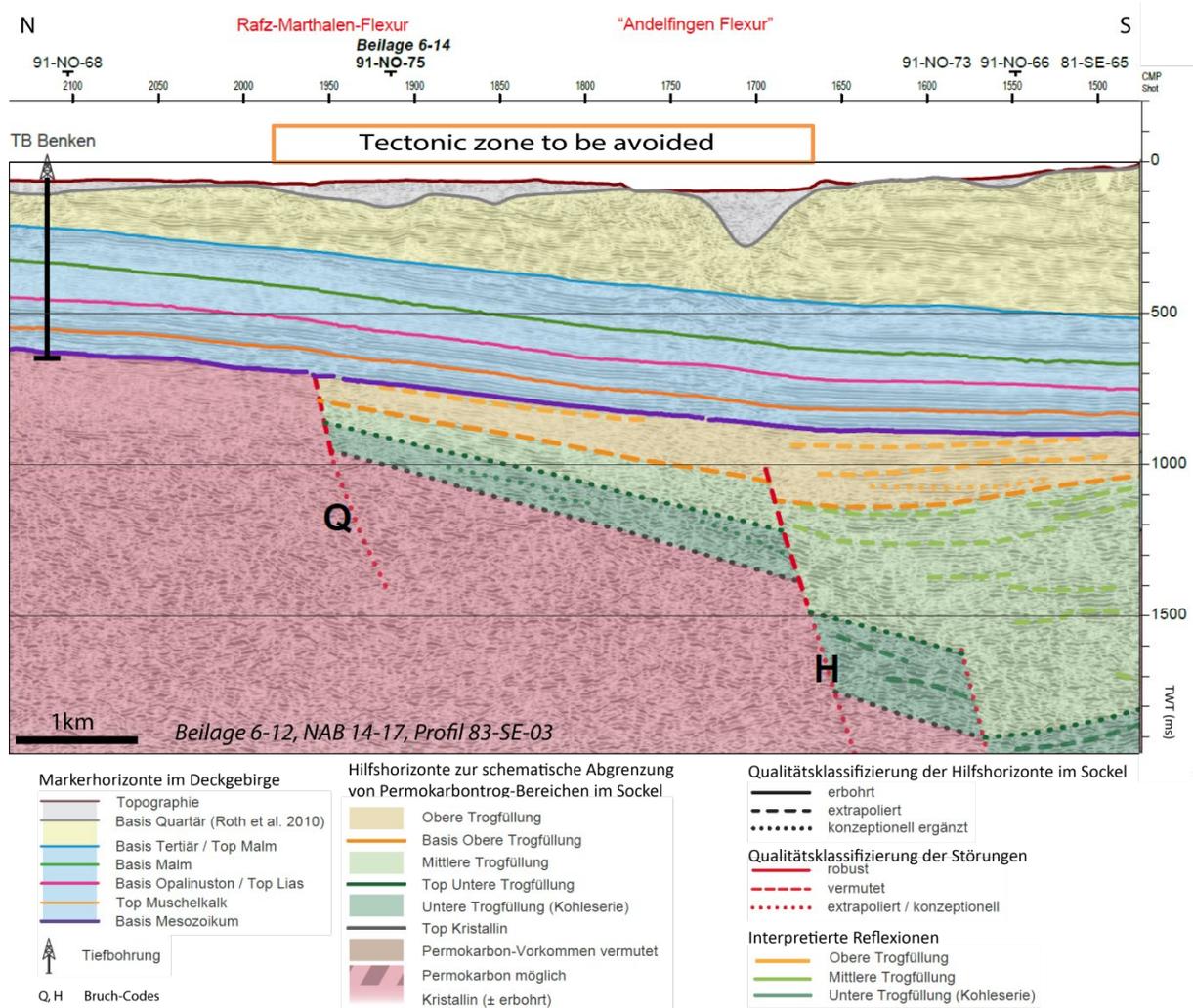


Figure 6-16: Location of the tectonic zone to be avoided (taken from Fig.4.4-4, NTB 14-02 Dossier II) in the Zürich Nordost siting area on the interpreted seismic line 83-SE-03 (from NAB 14-17, Beilage 6-12). According to Nagra, the tectonic zone to be avoided has been determined for this area on gravity data and on the Permo-Carboniferous through map. The interpretation of the Pre-Mesozoic units and faults of this TWT version line shows slight differences with the depth version presented in NTB 14-02 (Fig. 4.4-4). For location, see Figure 6-15.

91-NO-75

On the strike seismic line 91-NO-75 (Figure 6-17) a large scale anticline located west of the Neuhausen fault is recognizable on the TWT version and on the depth section (CMP 2500-2680). All the units from Base Mesozoic horizon to the Tertiary unit are gently folded and parallel. Given the fact that this structure is seen also on the depth-converted version, we suggest that it is not related to a velocity problem, but rather to tectonics. This horst-like structure in the basement is presumably of Pre-Mesozoic age (possibly Hercynian or Permo-Carboniferous). No clear onlap of Mesozoic series on Base Mesozoic horizon is visible. On top, we see also a folded structure of presumably Tertiary age since Cenozoic layers seem folded too. Do we have one single structure from the Pre-Mesozoic to the Tertiary unit? Most likely yes, but I do not have an explanation for this structure, but one could think of neotectonic (recent) activity in relation with the Neuhausen fault. See below Nagra's explanation on this topic.

Nagra's answer to Frage 33 (NAB 17-01):

“The Benken Horst is interpreted to reflect a Late Paleozoic structure in the first place, whose bounding faults were repeatedly reactivated later on (e.g. during Mesozoic and Cenozoic times). A neotectonic and possibly recent activity of these faults is not obvious, but cannot be entirely excluded (see conclusion in NTB 14-02 Dossier III chapter 3.8). This is one of the reasons why the “Rafz-Marthalen Flexur” (southern border fault of the Benken horst mildly reactivated in Post-Paleozoic times), which can be traced over several 2D-seismic profiles, was defined as zu meidende tektonische Zone and avoided as part of delineating the Lagerperimeters for the “Sicherheitstechnische Vergleich”, as was the “Neuhausen Störung” (presumed eastern border fault of the horst with clear signs for Late Tertiary activity) regarded as “Regionale Störungzone” (see NTB 14-02 Dossier II, Kapitel 4.5.2).

The other presumed border faults of the Benken Horst are the “Strukturzone von Niderholz” to the West and the “Wildensbucher Flexur” to the North. Both structures have a comparably local character and could only be mapped in detail with the help of 3D-seismic data. Nagra is aware, that similar structures may not yet be detected in other siting regions, where no 3D-seismic data are available in SGT-E2. In order to treat all siting regions equally in the course of the “Sicherheitstechnische Vergleich” of SGT-E2, these “3D-seismic scale structures” were not treated as regional tectonic elements and avoided straight away, but taken into account as “anordnungsbestimmende Störungszonen” (see NTB 14-02 Dossier II, Kapitel 4.5.2).

The structure addressed by the ENSI question and visible on profile 91-NO-75 is not considered to stem from a velocity problem. It is known as the “Antiklinale von Trüllikon” and was analysed in detail with the help (??) of 3D-seismic data (see NTB 00-03 by Birkhäuser et al. 2001, sections 4.6.2 page 90). While not directly linkable with a border fault of the Benken Horst, it does show signs for post-Paleozoic (Mesozoic and Cenozoic) activity. Most importantly, the “Antiklinale von Trüllikon” is not traceable over several 2D-seismic profiles (like the above mentioned “Rafz-Marthalen Flexur”) and as such, similar to the “Wildensbucher Flexur” and the “Strukturzone von Niderholz” a “3D-seismic scale structure”. For this reason it was not regarded as regional tectonic element, but as an “anordnungsbestimmende Störungzone”.

In NTB 14-02, a cross-section has been drawn along the 91-NO-75 seismic line (A 1-8 in NTB 14-02 Dossier II). West of the village of Oerlingen (CMP 2300), the décollement level (frontal Jura thrust) has been omitted in the Triassic layers of the figure. According to Nagra’s tectonic map of the area (Figure 6-11), the frontal Jura thrust is located here and this means that this area has been deformed during the Miocene time, possibly also later. From my point of view, this detail is important for the understanding of the geological evolution of the area.

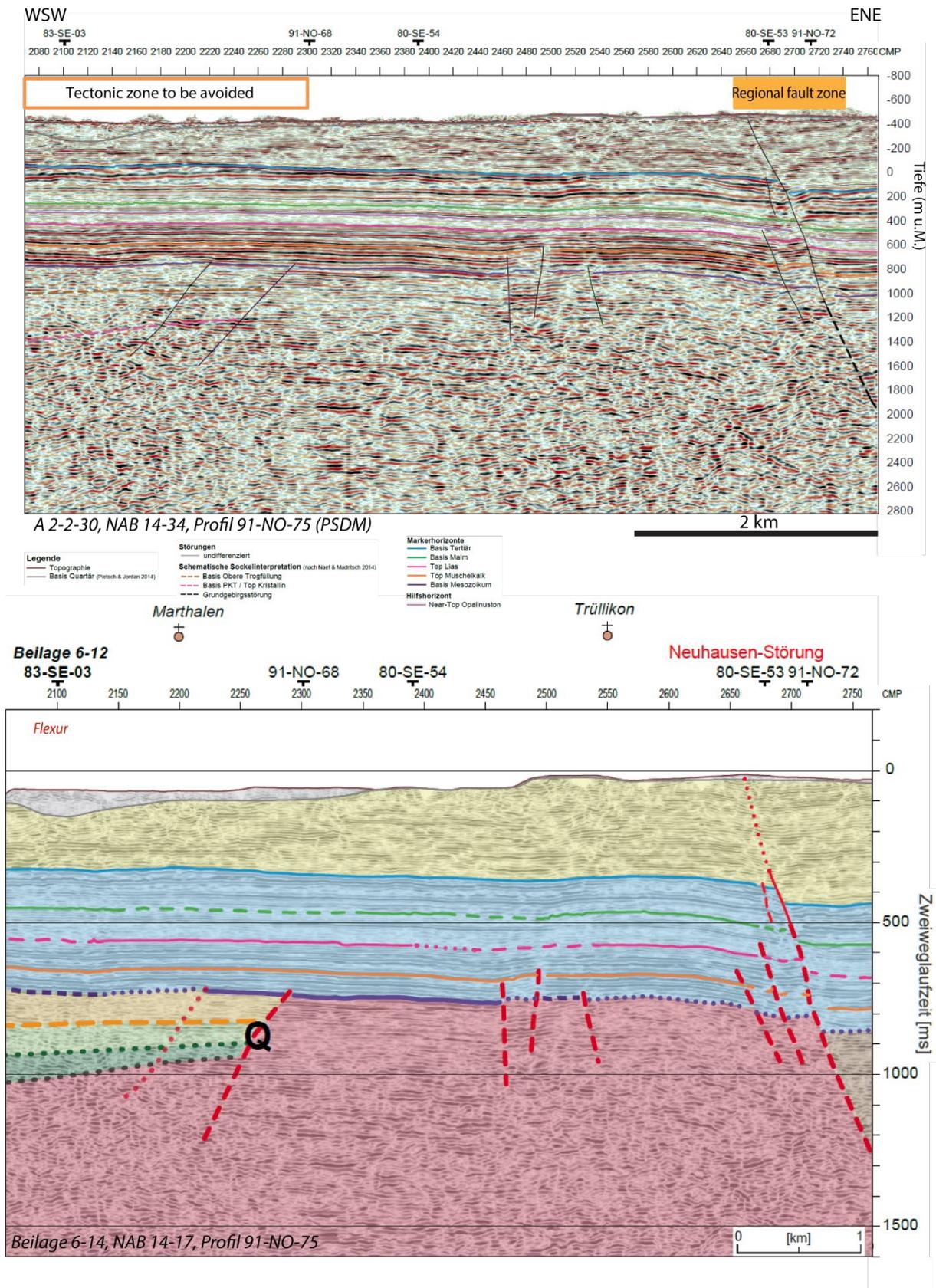


Figure 6-17: Illustration of the eastern part of the seismic line 91-NO-75 in depth (on top) and in TWT below. Tectonic zone to be avoided, regional fault zone and flexur have been added according to the CMP location on the Figure 6-15. For legend for the bottom picture see Figure 6-16 and for location see Figure 6-15.

91-NO-77

Recent movement on normal faults should also be considered beneath the Benken village. A fault (certainly layout-determining fault) has been drawn on the cross-section along the strike seismic line 91-NO-77 (Figure 6-18 below). This fault is not present on the seismic interpretation (Figure 6-18, A-31 in NAB 13-10). We can see on the enlargement (left side in the Figure 6-18) a bending of the layers but not a discrete offset (along the fault). Deeper layers are more bended than upper layers suggesting more activity in the Triassic and Early Jurassic time. What is Nagra's reason to put this fault on the depth section and when is this fault active? This question is part of the *Frage 34* addressed to Nagra (see NAB 17-01). Nagra's answer is as follows:

"The mentioned fault underneath the Benken village, which is visible on profile A1-8 of NTB 14-02 Dossier II, is associated with the "Wildensbucher Flexur". As notified by ENSI this fault is actually not visible on the 2D-seismic profile 91-NO-77. In the geological profile along this seismic section the structural interpretation was complemented according to the interpretation of the 3D-seismic data by Birkhäuser et al. (2001; NTB 00-03), which covers this area (see outline on profile construction by Jordan et al. 2014, NAB 14-105 page 54, 3rd paragraph).

As already outlined in the answer for ENSI Frage 33, the fact that the "Wildensbucher Flexur" could only be fully identified with the help of 3D-seismic data speaks against its classification as "Regionales tektonisches Element" in order to keep up with the SGT-requirement to treat all siting regions equally in the course of the "Sicherheitstechnische Vergleich". The structure is treated as "anordnungsbestimmende Störungszone".

The "Wildensbucher Flexur" was analysed in detail by Birkhäuser et al. (2001, NTB 00-03). It is inferred to be inherited from a Late Paleozoic basement fault (possibly constituting to the northern border of Benken Horst west of profile 91-NO-77). Within the Mesozoic and Cenozoic sedimentary stack it is constituted by an en echelon array of several minor normal faults. The 3D-seismic data suggests a kinematic link with the "Neuhausen Fault". As such the fault was definitely active during Cenozoic times. A neotectonic or even recent activity of the latter regional fault zone is not obvious, but cannot be entirely excluded (see conclusions in NTB 14-02 Dossier III chapter 3.8)."

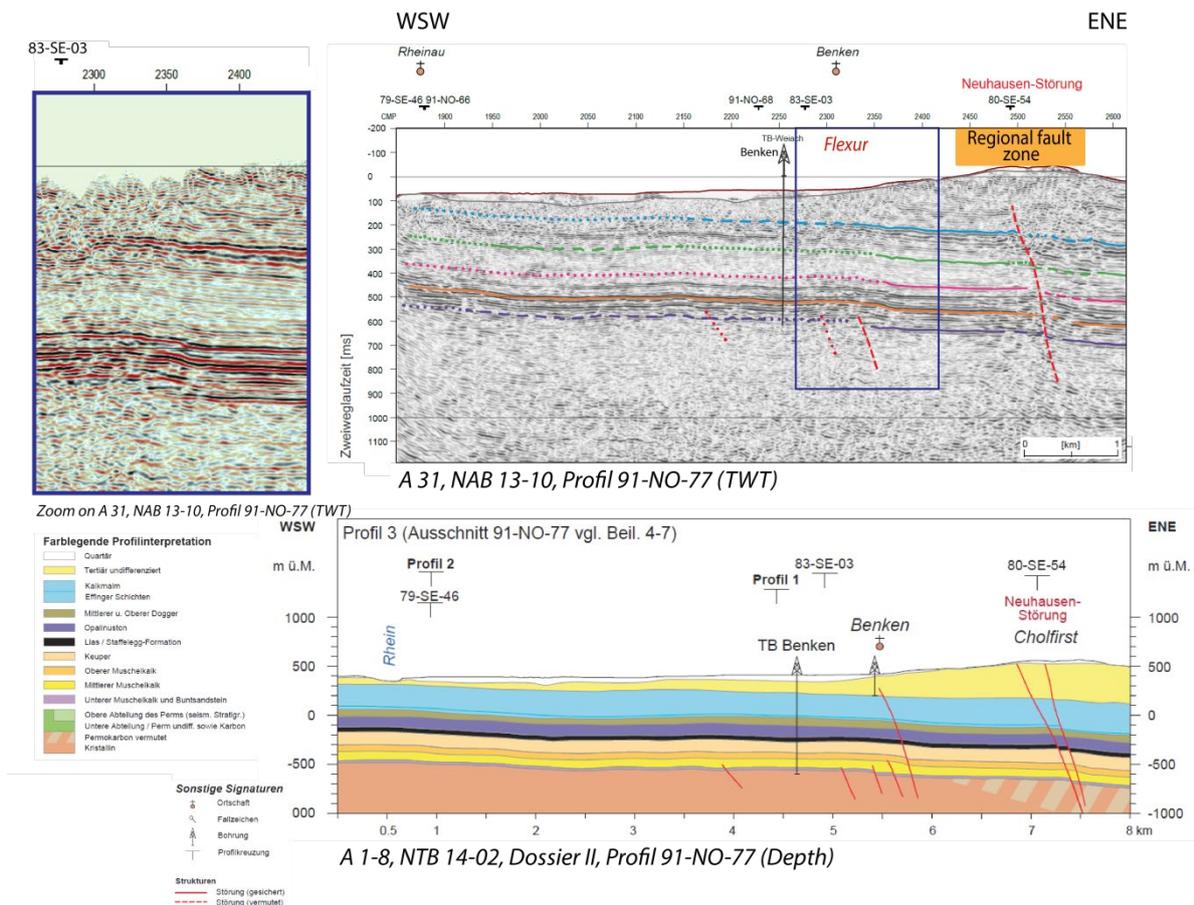


Figure 6-18: Illustration of the strike seismic line 91-NO-77 in TWT on top and converted to depth as a cross-section at the base. On the left, enlargement of the area in the blue rectangle on the seismic line. In the seismic section, the well name is Benken instead of Weiach (mistake on Nagra’s figure). Regional fault zone and flexur have been added according to the CMP location on the Figure 6-15. For legend see Figure 6-16 and for location see Figure 6-15

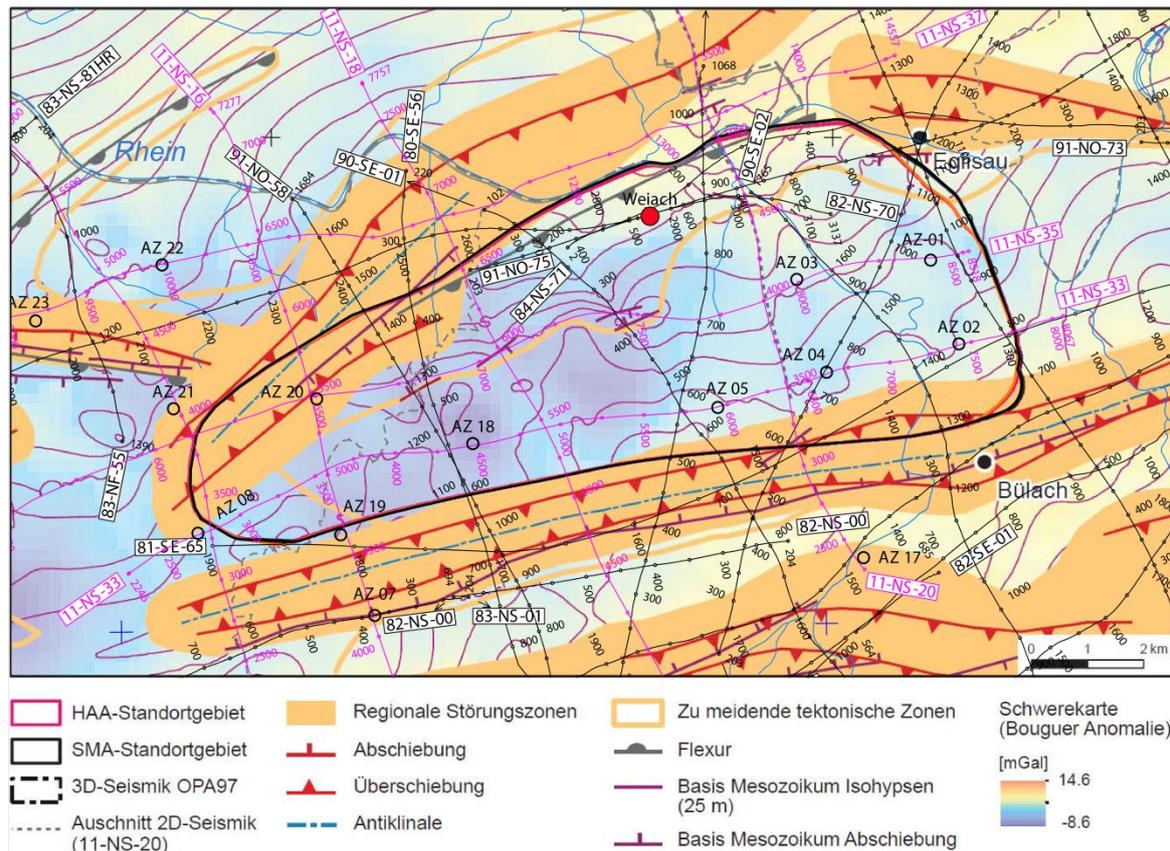
6.4.3 Nördlich Lägern siting region

The Nördlich Lägern geological siting region is located south of the Jura frontal thrust in the area called *Vorfaltenzone* (Figure 6-10). It is surrounded by three regional fault/fold zones (Figure 6-12 and Figure 6-19): the Siglistorf anticline to the North, the Eglisau fault to the NE edge and the Stadel-Irchel anticline (with lateral extension to the East into the Baden-Irchel-Herdern lineament). These zones are clearly visible on the seismic lines. In this siting region, Nagra has determined the southern area along the Siglistorf anticline as a tectonic zone to be avoided (Figure 6-19).

Numerous seismic data cover this siting region (Table 6-8): five newly acquired seismic lines and more than five old reprocessed seismic lines (either Nagra data or SEAG data). Weiach-1 well is located in the northern part of the siting region, and has reached Permian and Carboniferous sediments and even crystalline rocks beneath the Paleozoic sediments.

Line name	NAB 13-10-Beilage (TWT)	NAB 14-34 (PSDM)	NTB 14-02 (Depth)	NAB 14-17 (TWT)	NAB 14-58 (TWT)	Questions from ENSI
11-NS-18	Beilage 5-9	A2-1-9		Beilage 6-9		<i>Wie gut ist die Datengrundlage für die eingezeichneten Störungen im Grundgebirge? Sind diese belastbar? Bei diesem Profil geht es generell um die Belastbarkeit bei der Interpretation des Grundgebirges.</i>
11-NS-20	Beilage 5-10	A2-1-10		Beilage 6-10		<i>Die Nagra klassifiziert die nördliche Zone im Standortgebiet als tektonisch zu meidende Zone. Grund dafür sind die Trogränder des Permokarbons und Störungen in der Trias und des Juras. Frage: Wie belastbar sind dazu die Erkenntnisse aus der 2D-Seismik in diesem Profil? (CMP 4200 bis 5200)</i>
11-NS-35 (E part)	Beilage 5-13	A2-1-13	A2-5	Beilage 6-13	Beilage 3, Fig.11	<i>Die Nagra schlägt für Nördlich Lägern einen Lagerperimeter im östlichen Teil des Standortgebietes vor. Frage: Wie belastbar sind die interpretierten Störungen im Grundgebirge und im Jura und in der Trias zwischen CMP 7200 und 8200? Gibt es andere Interpretation-svarianten?</i>
Additional lines						
11-NS-16	Beilage 5-8	A2-1-8		Fig. 5.2		-
91-NO-58	A-22	A2-2-22	Beilage 4-3, A2-5			-
82-NS-70	A-06	A2-2-6	Beilage 4-8, A2-5	Beilage 6-1		-

Table 6-8: Seismic lines and related enclosures in reports for the Nördlich Lägern geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.



Seismic survey from Beilage 2-1, NAB 14-34; Regional fault zones/tectonic zones to be avoided from NTB 14-02, Dossier II, Fig. 4.4-5

Figure 6-19: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Nördlich Lägern siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated, only intervals of 25m are mentioned in the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra reports (references indicated below the legend).

11-NS-16

This dip seismic line images the two regional structures: the Siglistdorf anticline and the Stadel-Irchel anticline (Figure 6-20). The distance between the two zones is short, maximum 2 km. The depth conversion of this line (PSDM A2-1-8 in NAB 14-34) has given good results, with a better imaging than the TWT image. As a consequence, north of the Stadel-Irchel anticline a fault has been removed on the PSDM version (A2-1-8 in NAB 14-34) and on the DTconv version (Fig. 4-8 in NAB 14-34). In this case, this action looks comprehensible (nachvollziehbar), as explained in NAB 14-34 (Fig.4-8, p.34, caption of the figure): „Das markant verbesserte Abbild der DTconv-Version der Linie 11-NS-16 gegenüber der PSTM-Version machte bei erhöhter Kontinuität der Reflexionen auf dem Niveau der Trias und des Lias nördlich und südlich der Stadel-Irchel-Struktur Horizont- und Strukturanpassungen notwendig. Besonders nördlich der Stadel-Irchel-Struktur hatte sich das Reflexionsbild derart verändert, dass die ursprünglich interpretierten Über- und Aufschiebungen nicht mehr haltbar wurden“

11-NS-18

This dip seismic line crosses the two regional fault zones. The Stadel-Irchel anticline has been studied in detail by Nagra and coworkers resulting in a new model with fish-tail structures in the Cenozoic and Mesozoic layers. This new alternative integrates old synsedimentary faults, change in thickness of units, change in thrust vergence, multiple décollement levels and shallow fault

angles. This interpretation has been validated by classical evaluation of bed-length and area in cross-sections presented in a submitted paper by Malz *et al.* (Nagra's team co-authors). The "old" alternative, a flower structure model, is presented for comparison in the NAB 13-10 (see Fig. 6-3 in NAB 13-10). The Base Mesozoic horizon is offset by a normal fault named BIH (Baden-Irchel-Herdern lineament). This fault rooting in the basement could suggest another interpretation of the deformed layers (flower structure with in situ deformation?), but less plausible in the regional context (see legend Fig. 6-3 in NAB 13-10). Nagra's work is exemplar for the understanding of Stadel-Irchel anticline showing how to find a solution accommodating all the structural elements.

On the TWT version (Beilage 5-9 in NAB 13-10) at CMP 6300-5900 (Figure 6-20), three faults have been interpreted in the Mesozoic and one crosses the Base Mesozoic horizon (1 km south of the Siglistdorf anticline). These faults, apparently layout-determining fault, are located at the southern limit of the tectonic zone to be avoided (Figure 6-20). The lateral extension of this structure could be found on the dip parallel line 11-NS-20 located to the East.

ENSI's question on this line focusses on the interpretation of the basement or the Permo-Carboniferous troughs. Nagra's interpretation is convincing for the location of the faults D and N beneath the Mesozoic units (Beilage 6-09 in NAB 14-17) and for the *Zentraler Permokarbondrog*, but less convincing for the location of fault E. As a proof of the presence of Permo-Carboniferous sediments in this area, there is the Weiach-1 (-2) well which is located only a few kilometers further NE (see also discussion on the Permo-Carboniferous troughs in chapter 6.3.6).

Based on this seismic profile and other parallel profiles, Nagra interprets a flexure south of the regional fault zone (see map Figure 6-19) along the northern border of the NL siting region. The location of this flexure has been transferred on the Figure 6-20 of the seismic line (see *Flexur* written in red), which should allow to better understand what Nagra considers a flexure to be. We notice the s-shape deformation of the Mesozoic layers between 6500 and 6400 CMP, which can be considered as a flexure. A movement of the underlying tectonic blocks should cause the flexure and so certainly, a reactivation of the fault across Base Mesozoic horizon at CMP 6600 would be the cause. The flexure is not well discussed and described by Nagra: mapping of the axial surfaces of the flexure interpreted on the seismic line would render the interpretation of the flexure more credible (see discussion chapter 6.3.6). The quality of Base Mesozoic horizon is attributed to class 1 or 2. Considering the reflection quality, I would attribute rather class 2 to 3.

11-NS-20

This dip seismic line shows one layout-determining fault in the Mesozoic layers between CMP 4200 and 5200, south of the Siglistorf anticline. Nagra's interpretation of the structure is not fully clear. Interpretations vary laterally from West to East (from line 11-NS-16 to 11-NS-20, Figure 6-20). In the line discussed herein, one could alternatively suggest an early phase of a fish-tail structure (e.g. Stadel-Irchel), with alternation of forward and backward thrusts. Nagra classifies faults in the basement from "conceptual to uncertain". Seismic data show disturbed reflections and small offsets, which highlight the presence of a structure. The quality class 1 of Base Mesozoic horizon, as given by Nagra, in the tectonic zone to be avoided does not correspond to the reflection quality. In the southern part of this zone, we should give a class quality 2. At CMP 5000 circa, Nagra interprets a flexure, which is not obvious to see on the seismic line (Figure 6-20).

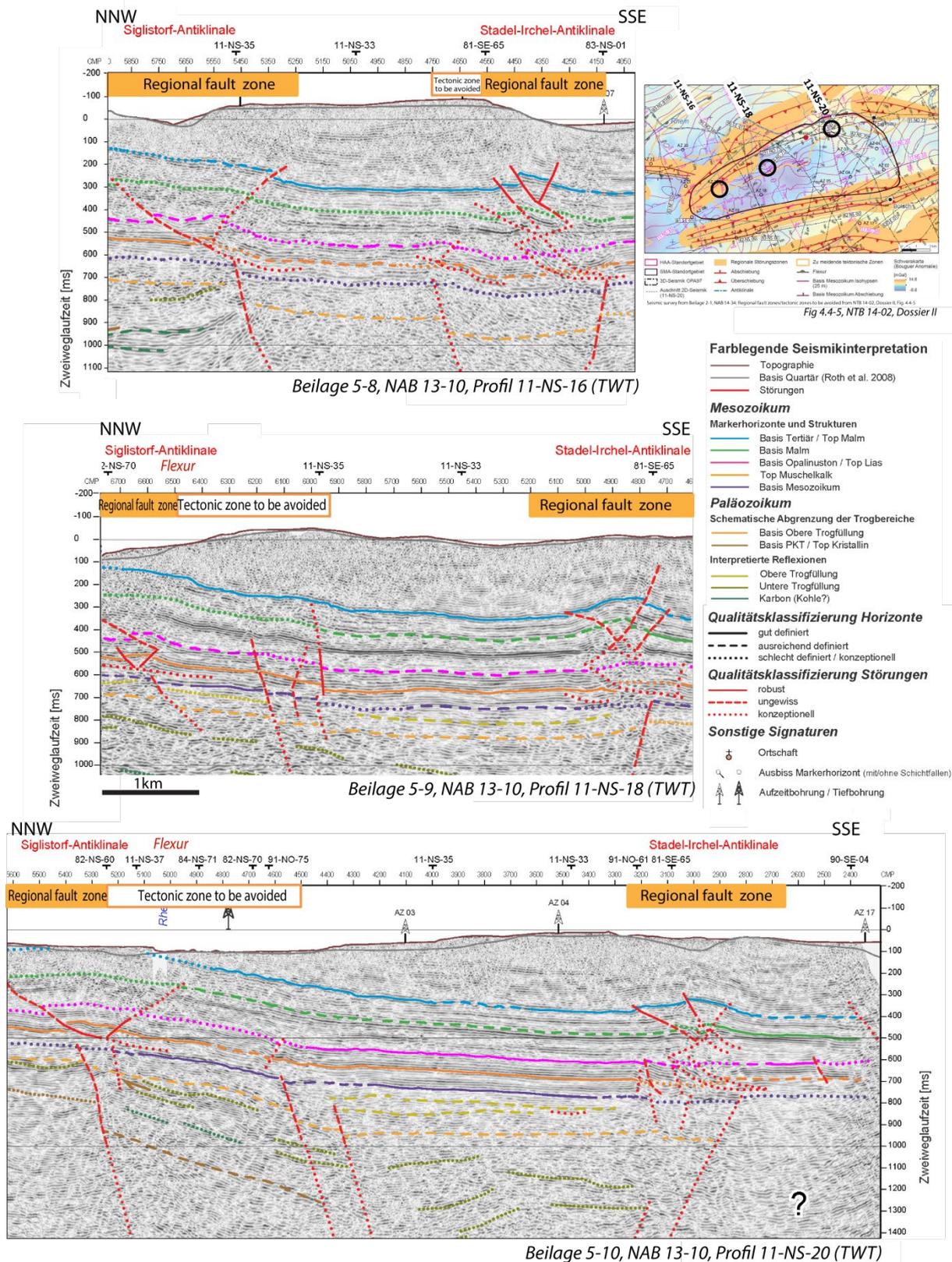


Figure 6-20: Interpretation of the faults (LDF) south of the Siglistorf anticline along three seismic lines in TWT. For reference of the figures, see below the lines. Black circles correspond to fault discussed in text. Tectonic zone to be avoided, regional fault zone and flexur have been added according to the CMP location on the Figure 6-15. For legend see Figure 6-16 and for location, see Figure 6-19.

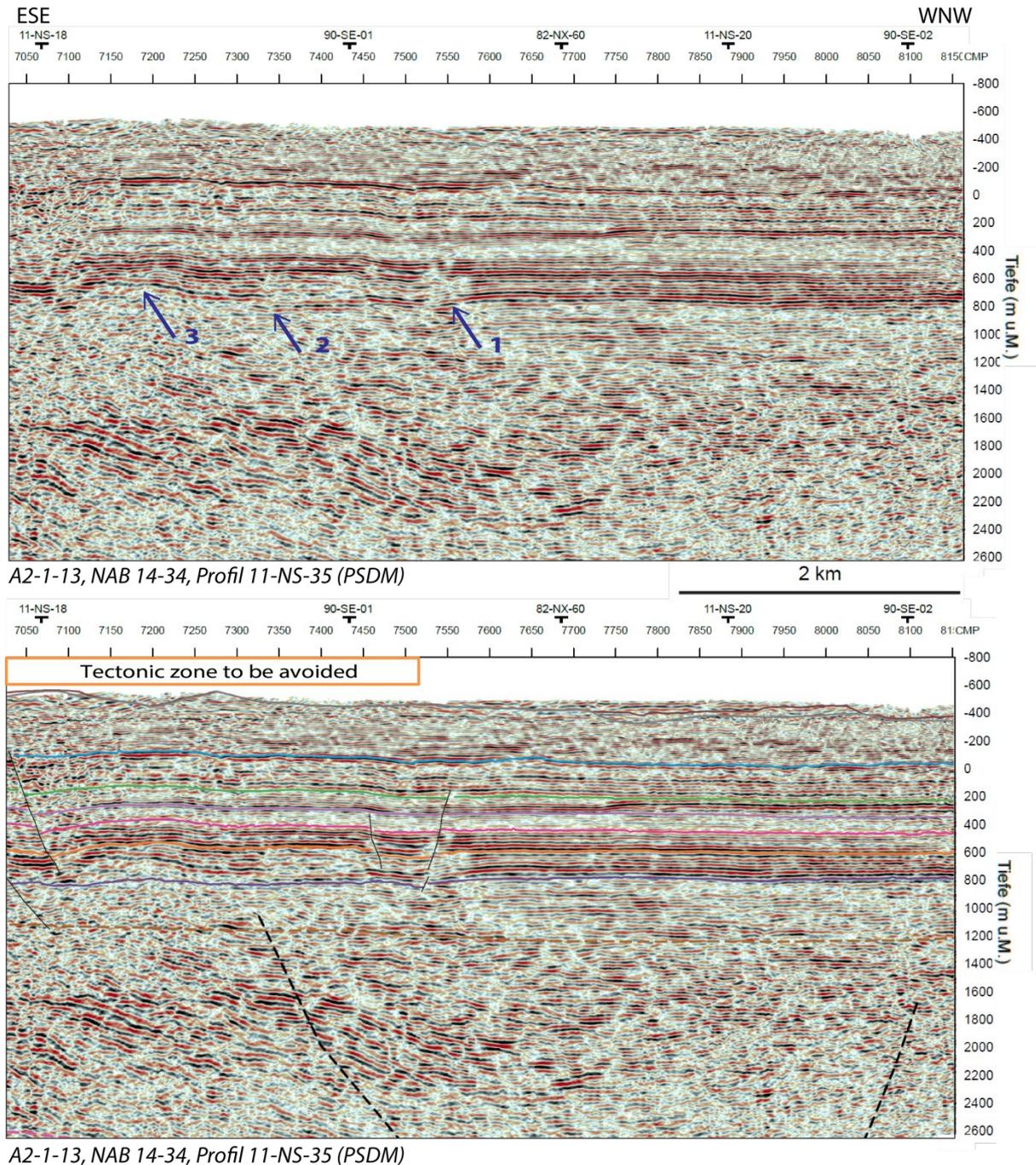


Figure 6-21: Seismic line 11-NS-35 (PSDM version, scale in depth). On top non-interpreted and below interpreted seismic line (from A2-1-13, NAB 14-34). For arrows number 1, 2, 3, see explanations in text. Tectonic zone to be avoided has been added according to the CMP location from the Figure 6-15. For legend see Figure 6-17 and for location see Figure 6-19.

As discussed above on the seismic line 11-NS-18, the formation of the Siglistorf anticline structure is not well understood yet. The link between this anticline and a reactivated fault crossing Base Mesozoic (D fault on Beilage 6-09 in NAB 14-17) is not clear, but could be suspected. This area needs to be studied more carefully during the Stage 3. Additional studies would probably elucidate this structure (type of faults and age of deformation) located in the *Vorfaltenzone*, which is the zone with most recent and possibly ongoing deformation (tectonics). By Including this zone into the tectonic zone to be avoided, Nagra supposes reactivation of the basement faults. This is certainly right, but to be sure, we would need more arguments and a 3D-survey.

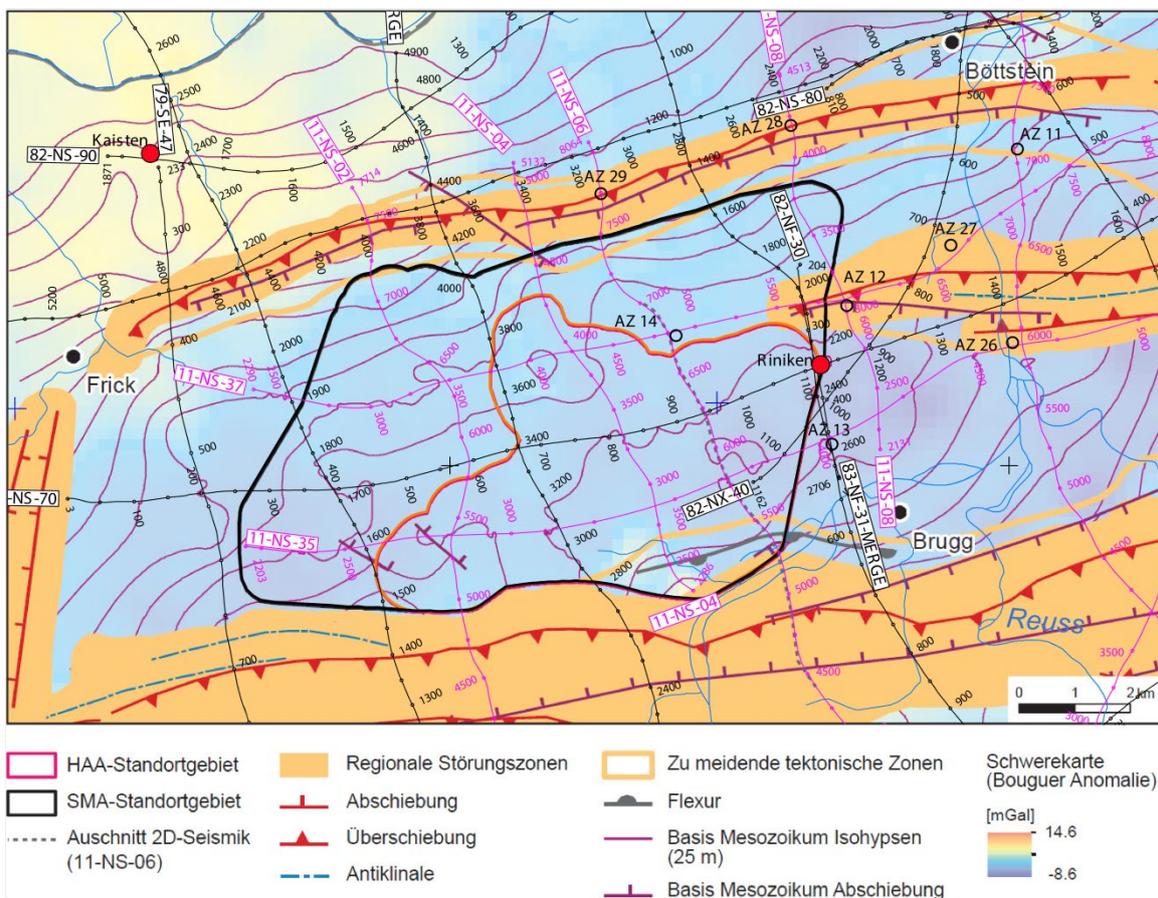
11-NS-35

ENSI's question concerns the interpretation beneath the Mesozoic layers. The number 1 fault on this strike line (Figure 6-21) offsets the Base Mesozoic horizon. This normal fault in Nagra's interpretation is the only one offsetting the Base Mesozoic horizon here. Reflections show also an offset where the arrow number 2 points. Base Mesozoic horizon is probably not as smooth as interpreted. Number 3 points at a feature with oblique reflections and change of thickness within the Triassic layers. It remains unclear whether this feature is only due to facies change.

In my opinion, sedimentary seismic facies of the Permo-Carboniferous trough filling are more easily recognizable than the faults, which remain conceptual on this seismic line (see also Beilage 6-13 in NAB 14-17).

6.4.4 Jura Ost siting region

The Jura Ost geological siting region is located in the *Vorfaltenzone* (Figure 6-11), between the Jura frontal thrust as mapped from seismic lines (Mandach thrust fault) and the main Jura thrust (*Jura-Hauptüberschiebung*) (Figure 6-12). They are two regional fault zones, located mainly outside along the geological siting region limit (Figure 6-22). To the East, the Siggenthal anticline ends at the border of this siting region. The Jura Ost siting region lies above the *Zentraler Permo-karbondrog* (Figure 6-13).



Seismic survey from Beilage 2-1, NAB 14-34; Regional fault zones/tectonic zones to be avoided from NTB 14-02, Dossier II, Fig. 4.4-6

Figure 6-22: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Jura Ost siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated, only intervals of 25m are mentioned in the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra reports (references indicated below the legend).

Numerous seismic data cross this siting region (Table 6-9): six new seismic lines and more than four old reprocessed seismic lines (either Nagra or SEAG lines). Riniken-1 well, which reaches the Permian sediments, is located at the eastern border of the geological siting region.

11-NS-04

This dip seismic line is located in the middle of the siting region. This line shows the deformed Mesozoic layers associated with the Mandach thrust. The interpretation of the Base Mesozoic horizon and the related faults is rather complicate. In contrast, south of this thrust, the layers are little deformed (Herznach-Bözberg *Tafel*). The southernmost part of this seismic line (CMP 3000-2350) is well illustrated in the NAB 14-34 (Fig. 4-3, p. 24) showing better continuity of the reflectors. This is also the case in the PSDM version as illustrated here in the Figure 6-23. The fault interpreted at CMP 3100 on the PSTM version is taken over on the PSDM version, even if reflections are continuous. This is questionable, because interpretation should rely on the seismic image. Below an excerpt of the caption of Fig. 4-3 from NAB 14-34 (p. 24), which explains the position of Nagra:

“Der Vergleich der PSTM- gegenüber der DTconv-Version der Linie 11-NS-04 zeigt letztere mit einem besonders oberhalb des Top Lias allgemein kontinuierlichen Reflexionsbild. Einige der in der PSTM-Version noch deutlich erkennbaren Störungen sind in der DTconv-Version nicht mehr so deutlich oder gar nicht mehr erkennbar. Diese Strukturen wurden bei der Interpretation in Tiefe trotzdem weiter mitgeführt. „

Line name	NAB 13-10-Beilage (TWT)	NAB 14-34 (PSDM)	NTB 14-02 (Depth)	NAB 14-17 (TWT)	NAB 14-57 (Effi) (TWT)	NAB 14-58 (BD) (TWT))	Questions from ENSI
11-NS-04	Beilage 5-2	A2-1-2					<i>Das Profil zeigt ruhige Lagerungsverhältnisse, einzig zwischen CMP 2900 bis 3000 ist im Tiefenbereich der Trias eine Variation in der Mächtigkeit zu beobachten. Ist diese Variation ein Artefakt (z. B. Geschwindigkeitsmodell) oder möglicherweise ein Effekt der Tektonik?()</i>
11-NS-06	Beilage 5-3	A2-1-3		Beilage 6-5 Fig. 5-1			<i>Dieses Profil zeigt Ähnlichkeiten mit dem Profil 11-NS-04. Wie kann die Anomalie (Verdickung) bei CMP 5800 bis 5900 im Bereich des Muschelkalks interpretiert werden? Existieren ähnliche Strukturen auf der Nachbarlinie 11-NS-04?</i>
11-NS-35 (W part)	Beilage 5-13	A2-1-13	A3-5	Beilage 6-13	Fig 10	Beilage 3	<i>Zu diesem Profil hat das ENSI keine Detailfragen</i>
Additional lines							
83-NF-15	A-13	A2-2-13	Beilage 4-4, A2-5	Beilage 6-4			-
82-NS-70	A-06	A2-2-6	Beilage 4-8, A2-5	Beilage 6-1			-

Table 6-9: Seismic lines and related enclosures in reports for the Jura Ost geological siting area. In the last column are the specific questions from ENSI.

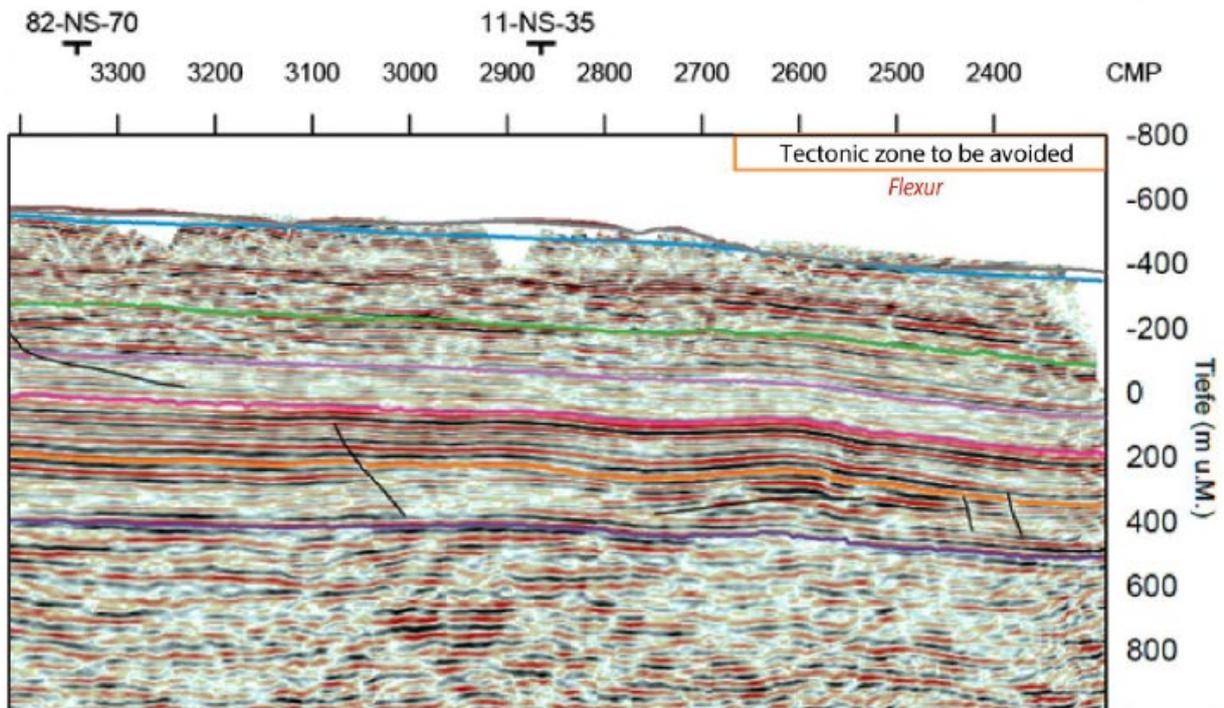
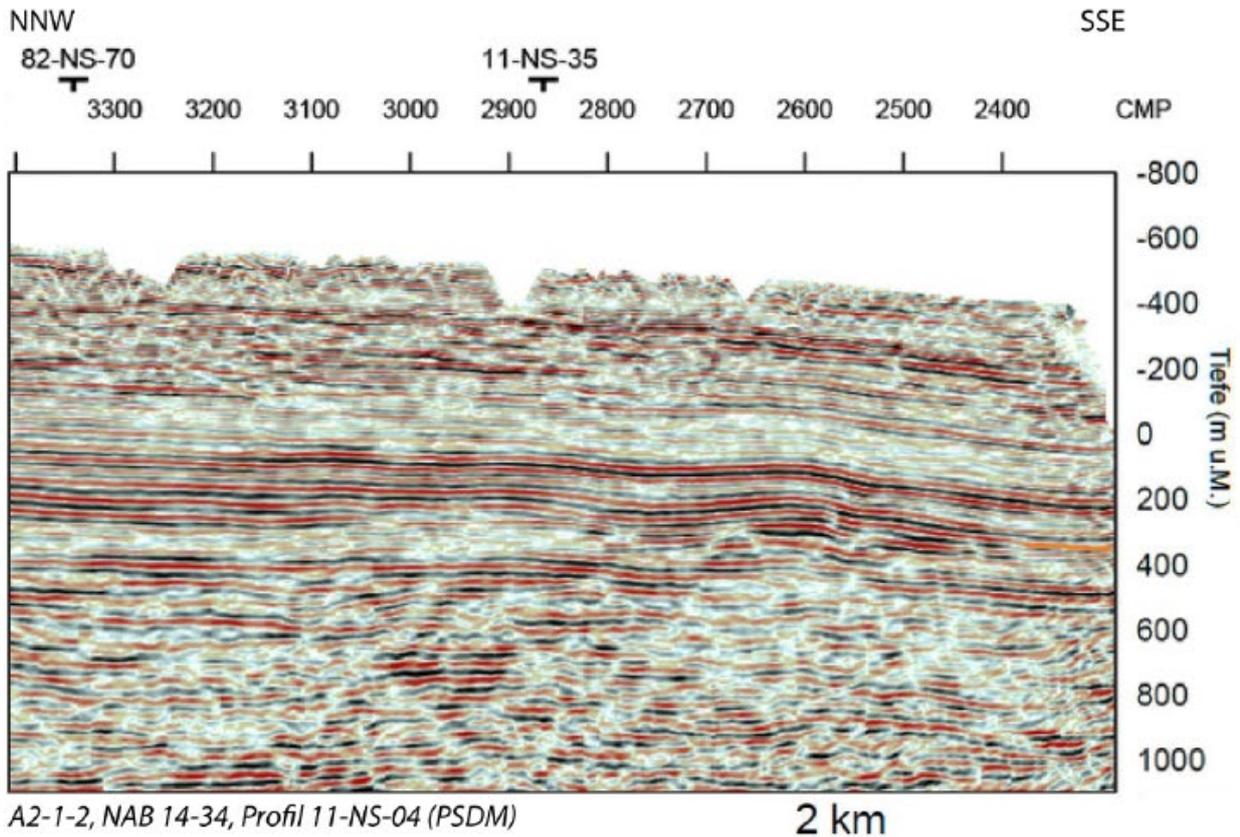


Figure 6-23: Southern part of the dip seismic line 11-NS-04 in depth (PSDM version). Tectonic zone to be avoided and *flexur* have been added according to the CMP location on the Figure 6-22. For legend see Figure 6-17 and for location see Figure 6-15.

ENSI asks if the change of thickness within the Triassic unit is due to velocity problem or to a related structure. We do not have convincing arguments to decide. Between CMP 2900 and 2400

on the PSDM version (Figure 6-23), two Mesozoic horizons (Top Muschelkalk and Top Liassic horizons) are wavy, while the Base Mesozoic horizon below is sub-horizontal. This leads to conclude that there is a lateral change of thickness within the Triassic unit (Muschelkalk layers). On the PSTM version, this lateral change of thickness does not appear clearly around CMP 3000, but is clearer around CMP 2600 at the southern end of the line. The zone between CMP 2650 and 2286 is considered by Nagra as a tectonic zone to be avoided; it includes a flexure. This flexure is not very clear on this interpretation. Nagra should have shown in a clearer way what is considered as flexure on this seismic line. The flexure is much clearer on the 11-NS-06 parallel seismic line. This zone, located at the frontal part of the Jura main thrust anticline (Figure 6-11), should be studied in details in Stage 3.

11-NS-06

This dip profile is quite similar to the profile 11-NS-04, but extends farther to the South and therefore crosses the main Jura thrust (*Jura-Hauptüberschiebung*). Beneath the main Jura thrust, we observe a sag structure in the Base Mesozoic horizon in Nagra's interpretation (PSDM version). From my point of view, the sag structure is a velocity artefact (velocity pull-down?) (e.g. Fig.4-4 in NAB 14-34). Otherwise, on the time version, the interpretation (e.g. Base Mesozoic horizon) should follow the reflections, which is not the case on this line. This type of change in the interpretation of the time (TWT) version, would yield a different interpretation when shown on a depth-converted profile.

ENSI's question concerns the interpretation of the thickening (CMP 5800-5900) within the Triassic beds. In this zone, we do not see a thickening in the Triassic beds, but rather discontinuities of the reflections within the Triassic beds. Base Mesozoic and Top Liassic horizons are sub-horizontal. A decreasing of the Triassic unit thickness starts at CMP 5550 and continues progressively toward the South up to CMP 5100. This change of thickness in the Triassic unit can be interpreted as sedimentary or salt flowage. If we compare with seismic line 11-NS-04, where we are on both seismic lines in the same structural position (north of the major Jura thrust), we would therefore expect to have the same features in the Triassic layers. However, we observe a minor difference. The presence of the flexure is clearer on this seismic line than on the 11-NS-04.

To the North, the lateral extension of the Siggenthal anticline - determined with a fault across Top Muschelkalk and Top Liassic horizons on seismic line 11-NS-08 - is recognizable with a small thickening in the Triassic beds (CMP 7300 and 6700). This supports that the anticline structure ends here.

The 11-NS-06 profile is the key line for the interpretation of the three Permo-Carboniferous facies in the troughs; the seismic facies are well defined on this line, which was used for their definition (see Fig. 6-3 in NAB 14-17). The line crosses the *Zentraler Permokarbondrog*. However, the fault system in the basement (e.g. K and L fault in Beilage 6-5, NAB 14-17) is interpreted differently on the Appendices (*Beilagen*) of various reports (compare with B5-3 and A2-1-3 in NAB 13-10 and). This shows that Nagra's interpretation of the minor faults in the basement is rather speculative and not consistent.

According to the regional fault zone map of Jura Ost siting area (Figure 6-22), the area (CMP 5250-5500) north of the main Jura thrust is considered as tectonic zone to be avoided. On this line, this is justified with the poorly defined seismic reflections in the Mesozoic units and the location of a flexure (which is recognizable on the seismic line). In addition, a potential reactivation of the faults across the Base Mesozoic horizon is possible, although the faults are qualified uncertain.

6.4.5 Jura-Südfuss siting region

The Jura-Südfuss siting region is located half in the Jura fold-and-thrust belt and half in the Molasse Basin (Figure 6-11). It is surrounded by three regional faults: to the North-East by the Schönenwerd-Eppenberg anticline, to the North-West by the Jura main thrust (*Hauenstein-Dottemberg Überschiebung*), to the South by the Born-Engelberg anticline (Figure 6-12). The Mesozoic layers have been detached from the basement and have been displaced toward the North by several km.

Numerous seismic lines cross this siting region (Table 6-10): three new seismic lines were acquired and five old reprocessed seismic lines were used (Figure 6-24). One recent well data exist within this siting region, the Gösgen SB-4 well and two wells are located outside of the siting region: the Schafisheim-1 well is located 5 km to the East and Oftringen-1 well 5 km to the SW.

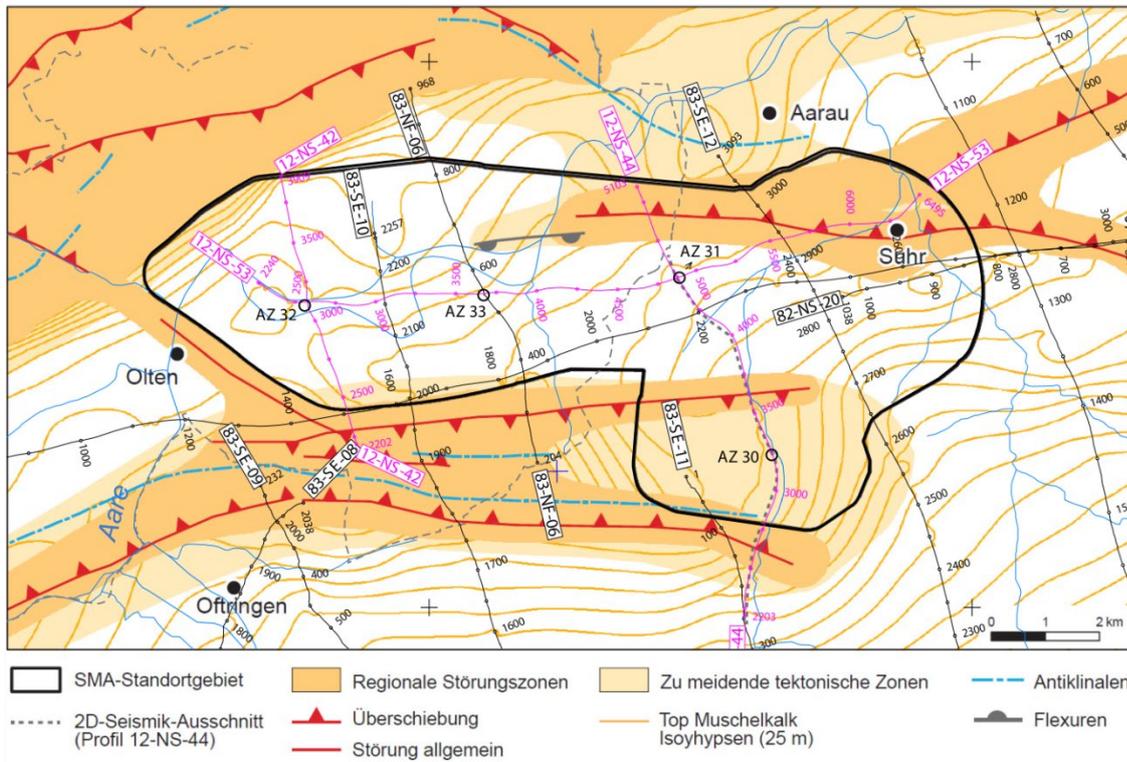


Figure 6-24: Map of the regional fault zones and tectonic zones to be avoided combined with the seismic location map for the Jura Südfuss siting region. Contours represent the Base Mesozoic horizon in depth (no precise depth value along the curve is indicated, only intervals of 25m are mentioned in the caption). Compilation made by swisstopo from two maps of Nagra reports (references indicated below the legend).

Line name	NAB 13-10-Beilage (TWT)	NAB 14-34 (PSDM)	NTB 14-02 (Depth)	NAB 14-17 (TWT)	NAB 14-57 (Effi)	Questions from ENSI
12-NS-42	Beilage 5-15	A2-1-15	A4-5		Beilage 6	<i>Der Fokus der Beurteilung in diesem Profil liegt generell auf dem OPA. Spezifische Frage: Wie belastbar ist die Interpretation der Störung bei CMP 3050 bis 3150 im Bereich des OPA? Wie signifikant ist die potentielle Verdickung in der Trias im Teil des Profils süd-südöstlich CMP 2500?</i>
12-NS-44	Beilage 5-16	A2-1-16			Beilage 7	<i>Der Fokus der Beurteilung in diesem Profil liegt auf den Effinger-Schichten und der Fortsetzung der Born-Engelberg-Struktur in dieses Gebiet. Welche Auswirkungen hat die Verdickung der Trias (duktilen Verhalten) auf die sich spröde verhaltenden Kalkbänke der Effinger-Schichten?</i>
12-NS-53	Beilage 5-17	A2-1-17	B4-9, A4-5	Beilage 6-15	Beilage 8, Fig. 13	<i>Im Grundgebirge sind starke Reflexionsbündel zu erkennen. Handelt es sich hier um Permokarbon (zwischen CMP 3600 und 5200)?</i>
Additional lines						
83-NF-06		A2-2-12	Beilage 4-5, A4-5			

Table 6-10: Seismic lines and related enclosures in reports for the Jura-Sudfuss geological siting region. In the last column are the specific questions from ENSI.

12-NS-42

Three faults (layout-determining faults) are interpreted along this dip line (Figure 6-25). The presence of the southern fault (CMP 3050-3150) is questionable; there is little evidence on the seismic line to interpret this fault. At the southern end of the seismic line, we can observe a thickening within the Triassic layers. The Nagra-Proseis AG team interpreted this structure as an evaporite-filled pillow, which makes sense. This thickening is related to the development of the Born-Engelberg anticline. On the parallel line, the 83-NF-06, the seismic facies of this thickening looks different and one could interpret other sediments than Triassic layers (Permian?) to be present. In the NAB 14-02 (Dossier II, A4-5 Profiles 2 and 3), geological sections across the Born anticline present an imbricate of Permian layers beneath the Born anticline. This new alternative interpretation

(different from the one on the seismic sections) should be discussed in more detail. A Permian imbrication has consequences on the shortening not only on the Born anticline, but also on the layers in the whole geological siting region. This interpretation is a completely new model, which has kinematic implications on the formation of the Jura fold-and-thrust belt (thin-skin versus thick skin models discussed in the literature). The Born anticline is surrounded by Tertiary sediments (Molasse) and represents the first fold in the eastern area. A comparison with the Hermrigen fold in Canton Bern (Sommaruga et al. 2012, Encl. 6) or Trecovagnes high in Canton Vaud (Sommaruga 1997), which are also first folds of the Jura belt should be included in this broad study. As a conclusion, the Born anticline interpretation should be looked at in more detail.

12-NS-44

The focus of this dip seismic line is, as the 12-NS-42 line, on the interpretation of the Born anticline. The interpretation of the Base Mesozoic horizon does not follow the reflections, which leads to an incomprehensible interpretation. Discussion on this anticline is the same as the one given above for the 12-NS-42 line.

ENSI questions on the deformation of the *Effinger Schichten* lying on top of the Triassic thickening. The thickening of the Triassic beds can lead to internal deformation on the above layers. Discontinuous reflections are visible on the line, but it is difficult to assess if they represent internal deformation within the *Effinger Schichten*.

12-NS-53

ENSI's question on this line concerns the reflections in the basement. Indeed, there is a series of good reflections and I would suppose Permo-Carboniferous sediments to be present, even if we cannot recognize the three series of seismic facies (*Obere Trogfüllung, Mittlere Trogfüllung, Untere Trogfüllung UT / "Kohleserie"*) which are explained in the NAB 14-17 (Fig. 5-1).

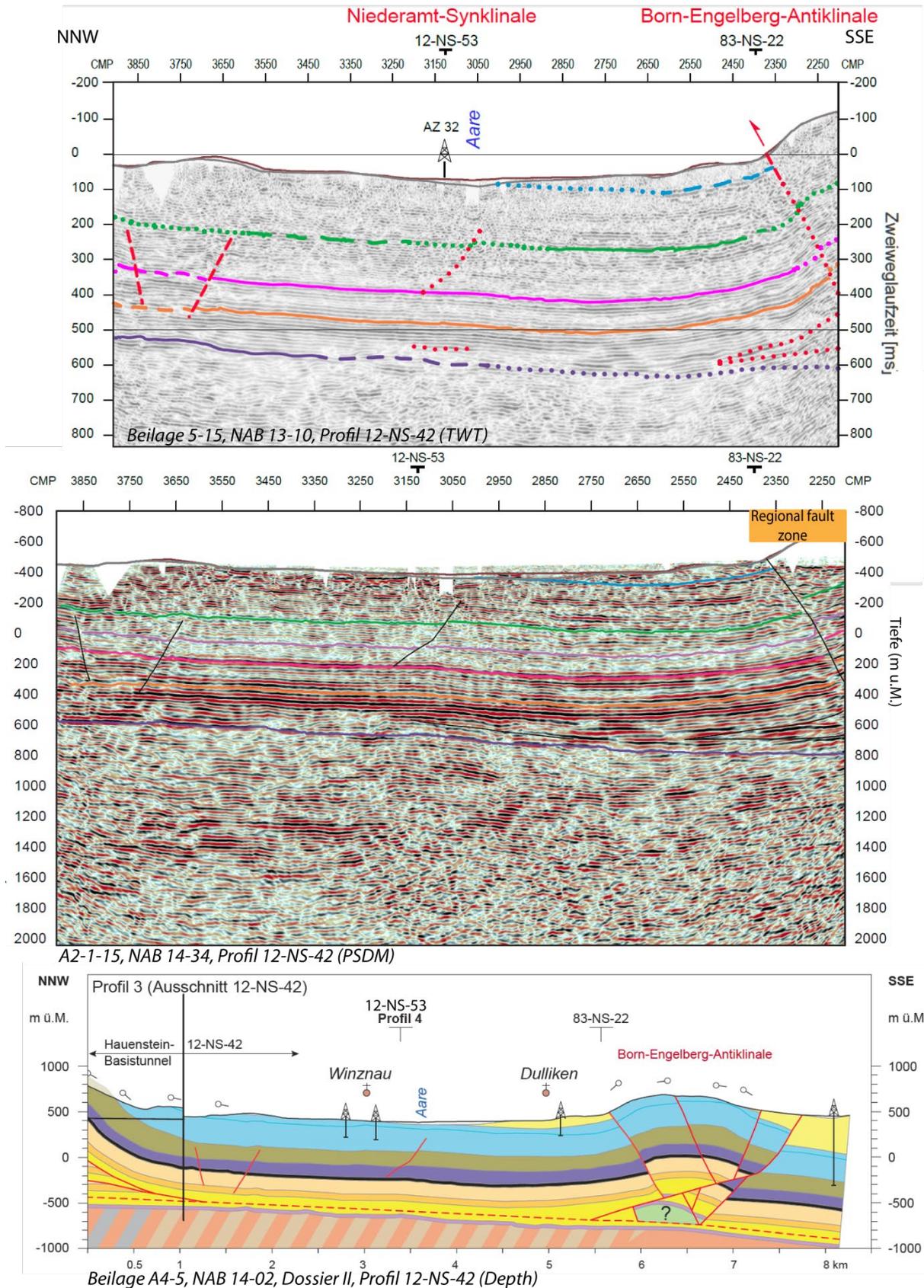


Figure 6-25: Interpretation of the Born anticline on three different seismic lines or cross-section. Regional fault zone has been added according to the CMP location from the For legend see Figure 6-17, Figure 6-18 and Figure 6-20. For location map see .

6.5 Answers to addressed questions

6.5.1 Answers to questions of “Schritt 1 von SGT - Etappe 2“

Frage 5.1: Sind die Interpretationen der Strukturen der seismischen Linien nachvollziehbar?

New acquired and old reprocessed seismic lines are of good quality allowing an interpretation of the structures in the Mesozoic and Cenozoic layers. Seismic line quality is appropriate to determine the major faults and the tectonically disturbed zones. All regional fault zones have been localized and interpreted. Few minor faults proposed by Nagra are at this step not comprehensible.

Frage 5.2: Wurde bei der seismischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

In most cases yes: the authors discussed in the text two interpretations when it was necessary and they even showed an alternative model for one specific structure. They also used low quality classes for horizons and faults to present their uncertainties. In a few cases, I would have expected more caution at this step of the procedure, especially in the interpretation of the Base Mesozoic horizon (poorer quality class).

6.5.2 Answers to questions of “Schritt 2 von SGT - Etappe 2“

Frage 5.3: Sind Lokation und Verlauf von regionalen Störungszonen, von anordnungsbestimmenden Störungen und von zu meidenden tektonischen Zonen nachvollziehbar?

Regionale Störungszonen

The location and the outline of the regional fault zones have been well defined and well interpreted on the 2D-seismic data. The regional faults can be seen on the seismic data. Most of the regional faults were already known from former Nagra studies, but the new acquired 2D-seismic data and the reprocessed old seismic lines helped to refine the location, the shape and to link fault segments. All regional fault zones have been detected. The location of these zones on the depth converted seismic lines is similar to the one on the TWT data.

However, the interpretation of the seismic horizons within regional fault zones should be discussed in more detail in the next stage SGT – E3. The interpretation and the depth conversion of the seismic horizons (especially the Base Mesozoic horizon) beneath the Jura main thrust fault should have been made with detail (see discussion in chapter 6.3.5). The structure of the Born anticline with a Permian sediment imbrication (see chapter 6.4.5, line 12-NS-42) which comes as a surprise needs also a detailed discussion. Further studies would improve the comprehension of the investigated area.

Anordnungsbestimmende Störungen

This type of faults (LDF) is poorly discussed on the interpreted seismic lines or in the two related reports (NAB 13-10, NAB 14-34). The vertical offset of these faults is close to the 2D-seismic resolution and they do not have any lateral correlation from one line to another one, which is why their direction is only loosely constrained. These faults are considered in a separate report (NAB

14-88), but from a more theoretical/statistical point of view. The presence of these faults is uncertain, because some of them are not seen on all seismic line versions for a specific line (TWT version, depth-converted version).

Zu meidende tektonische Zonen

The tectonic zones to be avoided are defined on maps, but unfortunately not shown on all relevant seismic lines. These zones cover areas, where there are structures affecting the Mesozoic layers or where there is supposed reactivation of Permo-Carboniferous through faults. Nagra includes also flexures of Mesozoic-Cenozoic layers caused by movement along faults in the basement. These zones are well located in each siting region. In Zürich Nordost, we raise the question if not to enlarge this zone towards the Southeast of Benken-1 well, because of the presence of a large amplitude fold (called by Nagra as Trüllikon anticline, see answer from Nagra to question 1 in chapter 6.4.2) which is not fully understood.

Frage 5.4: Ist die geologisch-tektonische Interpretation der seismischen Linien vollständig?

The geological interpretation of the seismic lines is mainly complete in the siting regions, although we miss some explanations or discussions on the evolution/age of some structures, especially since different deformational events are known in northern Switzerland (NAB 14-02, Fig. 1.3-2).

Outside the geological repository perimeter, regional structures are identified, but are not interpreted in detail. Although considered irrelevant by Nagra, we believe that Nagra should present also detailed interpretation (TWT and depth) for these zones (see chapter 6.3.5) - often located at both edges of the repository emplacement - in order to give credibility to their entire work and to add to the understanding of age and evolution of these faults. Places of interference between two faults, even not located in or near the siting regions, may well serve to identify their age relationship and kinematics, which are regionally relevant.

The additional horizon Top Opalinuston – even if it is mostly conceptual - on the depth version (PSDM) has completed the set of horizons necessary for this kind of work.

Frage 5.5: Wurde bei der geologisch-tektonischen Interpretation der durch die geophysikalische Datenverarbeitung u.U. entstandenen Mehrdeutigkeit der Modelle genügend Beachtung geschenkt?

The interpretation on the depth converted seismic lines (PSDM version) is mainly imported from the interpretation in TWT. In most of the seismic lines, this makes good sense, because the imaging of the reflections is very close. In some cases, the imaging in DTconv version is better and the seismic reflections are different (more continuous). In their reports Nagra highlighted these cases (especially faults), but decided to keep the version from the TWT interpretation (e.g. line 11-NS-04 in Fig. 4-3, NAB-14-34). This conservatism is questionable, for example beneath the major anticlines (located in regional fault zones), where interpretation in time leads to inappropriate structures on the depth-converted lines (e.g. line 11-NS-16 in Fig. 4-4, NAB 14-34).

6.5.3 Answers to additional questions on specific seismic lines for siting regions

The answers to these questions addressed by ENSI are placed in chapter 6.4.1 to chapter 6.4.5 with the discussion on the specific siting region (SR, ZN, NL, JO and JS).

6.5.4 Answers to additional questions concerning tectonic zones to be avoided and space requirement

ENSI questions (written below in *Frage 6.1 bis Frage 6.4 and Frage 7*) addressed to the 2D-seismic experts are related to the limits of the tectonic zones to be avoided established by Nagra.

6.5.4.1 Tectonic zone to be avoided in the Nördlich Lägern siting region.

Frage 6.1: Ist der Zusammenhang zwischen dem Rand des Nordschweizer Permokarbondtroges, der Flexur (NTB 14-01, Dossier II, Fig 4.4-5) und dem Störungsbild aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland belastbar?

The question concerns the relevance of the link between the location of the Permo-Carboniferous troughs, the flexures and the basement faults seen on the 3D-seismic in the Zurich Nordost siting region.

The observation from the seismic data have been discussed in chapter 6.4.2 regarding the ZN geological siting region. The 3D-seismic survey has helped to link laterally the individual basement faults. To determine the presence of Permo-Carboniferous sediments on the seismic lines, it is necessary to see reflections beneath the Base Mesozoic horizon. This is a case on the Figure 4.4-3 from NTB 14-02 (Dossier II), where we see high amplitude reflectors contrasting with non-reflective areas. The location of the faults is not well constrained by the reflectors in the supposed Permo-Carboniferous sediments, while in the Triassic unit, it appears better constrained. To link the faults from Triassic to Pre-Mesozoic unit seems coherent according to the geological evolution of the area, even if it is not clear from the seismic data. The location of the flexure is not very well illustrated.

A link between all these structural elements identified by Nagra certainly exists, but Nagra does not convince the reviewer in its reports (Nagra should assemble all the arguments on one or two figures). A mapping of the flexures (axial surface traces) on top of the contour map of the main marker seismic horizons (e.g. Base Tertiary, Top Liassic, Base Mesozoic) would allow to follow all the criteria.

Frage 6.2: Wie aussagekräftig sind die Neigungskarten des Top Lias?

The dip maps of the Top Liassic presented by Nagra (included in the answer to Frage 28) are based on the contour depth maps of the Base Opalinuston horizon. The latter maps presented in *Beilagen* of NTB 14-02 (Dossier II) cannot be considered by the reviewer in the assessment of the regional fault zones, because the contours are covered by fault zone polygons (e.g. A2-8 in NTB 14-02 Dossier II).

The scale of the dip maps is ranging from 1° to 10°. One degree of change in dip represents 10% on the scale of dip. Nagra uses these dip maps, among other data, to determine the tectonic zones to be avoided. These maps show areas where the dip is higher and I agree that we can consider higher dip as one of the criterion to determine the tectonic zone to be avoided. In that sense, the amount in degree of dip to include in tectonic zones to be avoided should have been indicated and applied systemically. It looks like this criterion of high degree in dip to include some areas is not applied systemically in an objective way (e.g. in NL, south of Eglisau and in ZN, SE of Benken). In my opinion, these maps are not meaningful by themselves, but they could contribute to evaluate the critical zones (e.g. tectonic zones to be avoided, regional fault zones).

Frage 6.3: Ist die von der Nagra auf Basis der 2D-Seismik ausgewiesene Flexur am nördlichen Rand des Standortgebiets NL nachvollziehbar und belastbar?

The term of flexure has not been discussed and defined in the recent reports by Nagra. Flexures are used in the reports as a criterion to determine the tectonic zones to be avoided, and so I would have expected a clearer definition and a precise mapping related to observations on the seismic lines. This is not case, as highlighted in the answers from Nagra to the related questions on flexures (see questions and Nagra's answers in chapter 6.3.6 Flexures). The flexure location in the NL siting region is illustrated on the map of Figure 6-19. The new acquired seismic lines 11-NS-18 and 11-NS-20 cross the flexure (Figure 6-20), but Nagra does not located it on the seismic interpreted lines (*Flexur* word in red has been added for this review, see caption of the figure). I suppose that Nagra interprets as flexure on the 11-NS-18 seismic profile, the s-shape deformation of the Mesozoic layers between 6500 and 6400 CMP (see discussion in chapter 6.4.3). A movement of the underlying tectonic blocks should cause the flexure and so I suppose that a reactivation of the fault across Base Mesozoic horizon at CMP 6600 would be the cause. On the parallel seismic line 11-NS-20, the flexure is mapped by Nagra around 5000 CMP, but it does not appear so clearly on the seismic line. The Base Mesozoic contour map does not indicate clear changes in dip along the mapped flexure trace (Figure 6-26). The tectonic zone to be avoided is located on the steeper part of the Base Mesozoic horizon. Here the mapping of axial surface trace would have helped to convince the reviewer and to make it more comprehensible.

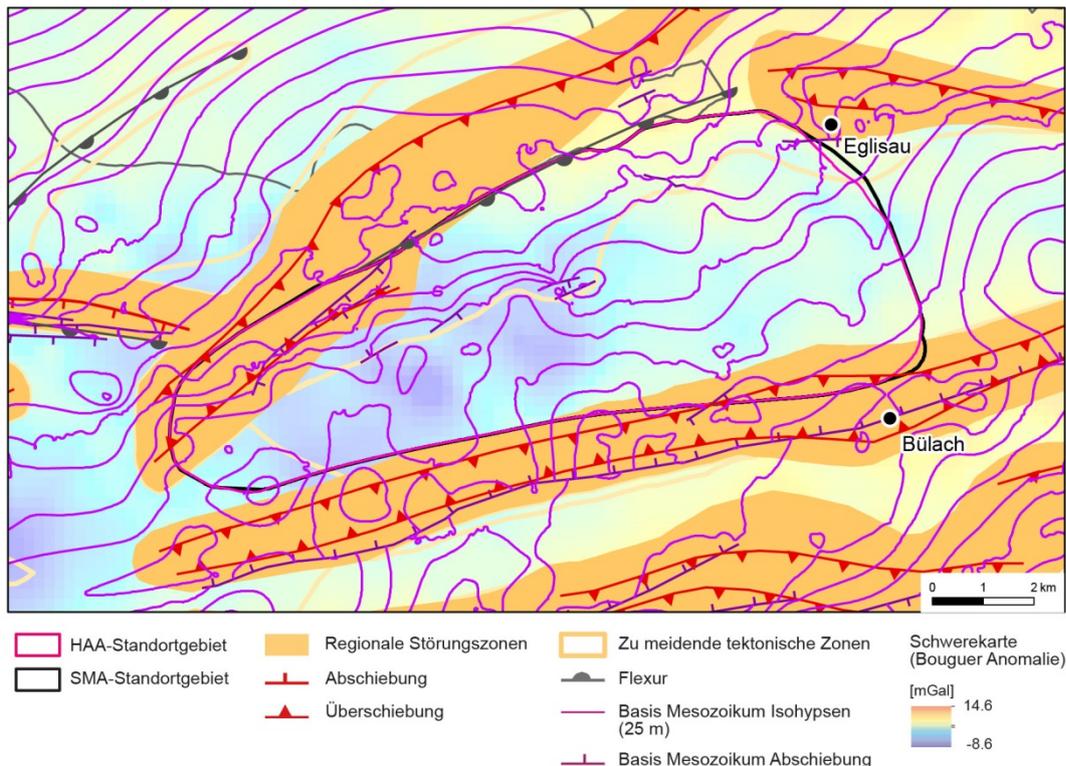


Figure 6-26: Alternative version of NTB 14-02 Dossier II Fig. 4.4-5 with contours of the Base Mesozoic horizon shown on top of the regional fault zone polygons. From Nagra, inserted in the answer at *Frage 63_Flexur*.

Frage 6.4: Kann aufgrund der Erfahrungen aus dem Standortgebiet ZNO (Hinweis auf Zusammenhang zwischen Permokarbondrog, Flexur und Strukturzone) für das Standortgebiet Nördlich Lägern eine potentielle Strukturzone antizipiert werden?

There are similar issues in ZNO and NL geological sitting region: edge of Permo-Carboniferous through, interaction with Mesozoic and Cenozoic layers, possible fault reactivation. So far, the structures along the northern part of the NL sitting region are not well understood yet and especially a correlation from one dip seismic line to the next one is not clear. This is discussed in chapter 6.4.3, where we described the structural elements of the seismic lines. A 3D-survey would be necessary and certainly would allow to better understand this area. Nagra should illustrate precisely all the structures on contour maps and seismic profiles.

6.5.4.2 Space requirement

Frage 7: Ist es fachlich nachvollziehbar und gerechtfertigt, eine unterschiedliche Anzahl an anordnungsbestimmenden Störungen in den Lagerperimeter der Standortgebiete anzunehmen (zum Beispiel dass für die Standortgebiet NL und JS die Anzahl der Störungszonen viel grösser ist als für die anderen)? Wenn ja, was ist die Daten-grundlage für diese Annahme?

The layout-determining faults (LDF) are defined (chapter 3.3) from an engineering perspective, where the vertical offset is close to the limit of the 2D-seismic resolution (>20 m). No correlation from one seismic line to another seismic line can be made and on 2D-seismic data, they do not have a clear geological extent. The number of faults is based on seismic data. Nagra has certainly interpreted all the LDF faults visible on the 2D-seismic data, but we cannot exclude that a LDF has not been interpreted by Nagra. 3D-seismic data will constrain the interpretation of this type of faults. These LDF are almost not discussed in the seismic reports.

The number of faults is a convincing argument if you take into account the lateral extension of the faults, the type of offset and in which lithology they are located. Here, we do not have all these elements. In that sense, it is justified to have a different amount of LDF faults in each area.

6.6 Statement

This evaluation is based on several Nagra reports (mostly reports publically available) and meetings concerning the interpretation of the new acquired (2011/2012) and old reprocessed seismic lines included in the SGT – E2. Although many reports were consulted, three main reports include the seismic interpretation of the profiles (NAB 13-10, NAB 14-34, NAB 14-17) and one separate report (NAB 14-02, Dossier II) present the geological structures with the regional fault zones and the tectonic area to be avoided. However, a final synthesis report on the seismic interpretation is missing.

The 2D-seismic data have been correctly interpreted by Nagra. Seismic horizons have been tied accurately to the wells and their interpretation is mostly precise across all of northern Switzerland. However, the Top Opalinuston horizon remains mainly conceptual and the Base Mesozoic horizon shows a variable quality of reflections across the whole area. The interpretation of the seismic horizons within the Jura main thrust fault regional zone could have been presented in more detail.

Regional fault zones (*Regionale Störungszonen*) are well located on the seismic data and Nagra has identified all regional fault zones. Additionally, limits of tectonically disturbed zones named

tectonic zones to be avoided (*Zu meidende tektonische Zonen*) within the geological siting regions are highlighted on maps, but only on few seismic lines. The outline of these zones is mainly justified, because of the presence of faults or structures in the Mesozoic or Pre-Mesozoic units, which could have been active in the last 5 Mio years and could be reactivated in the future. Next Stage 3 should clarify more precisely the geometry and the offset of the faults. For the aspects of regional fault zones and tectonic zones to be avoided, Nagra has answered with success to its major aims (identify the geological settings of regional faults and tectonic zones to be avoided) even if we would have expected in some cases more precise illustration of its arguments.

The location of the local-determining faults (faults with no lateral correlation) has to be evaluated in more detail during Stage 3 (SGT – E3) in order to refine the outline (*Lagerperimeter*) of the L/ILW and HLW repositories. Outlines of the faults across the Base Mesozoic horizon located at the edge of a Permo-Carboniferous trough are not very well defined on the 2D-seismic data. On this 2D-seismic data, the location of the Permo-Carboniferous remains partly speculative. The understanding of the geological evolution of the Permo-Carboniferous troughs was for Nagra not a major aim in the interpretation in Stage 2 (SGT - E2). In the next Stage (SGT – E3), in order to refine the outline of the repositories in the selected siting regions, some aspects should become prime goals: a 3D survey in order to refine the understanding of the geological evolution of the Permo-Carboniferous troughs together with the kinematic model of the siting regions. Refined balanced cross-sections across the area investigated in Stage 2 (including regional fault zones) and based closely on the geophysical data should be integrated. Even details within these regional fault zones – considered irrelevant for the repositories - should be represented accurately. Otherwise, a problem of credibility may arise. Based on these new elaborated models, Nagra could evaluate the risk of the reactivation of the faults in the future.

6.7 References

- Bini, A., Buoncristiani, J.-F., Couterrand, S., Ellwanger, D., Felber, M., Florineth, D., Graf, H.R., Keller, O., Kelly, M., Schlüchter, C. & Schoeneich, P. (2009): Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM). Karte 1:500'000. Bundesamt für Landestopografie swisstopo.
- Burg, J.P., van den Driessche, J. & Brun, J.-P. (1994): Syn- to post-thickening extension in the Variscan Belt of Western Europe: modes and structural consequences. *Géologie de la France* 3, 33-51.
- Dooley T.P. and Schreurs G. (2012): Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics* 574–575 (2012) 1–71.
- ENSI 33/470: “Review of the kinematic interpretation of the tectonic structures in northern Switzerland”, Expertenbericht im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager, swisstopo 2016.
- Green, A.G., Merz, K., Marti, U. & Spillmann, T. (2013): Gravity data in Northern Switzerland and Southern Germany. Nagra Arbeitsber. NAB 13-40, Wettingen: Nagra, 2013
- Jordan, P., Graf, H.R., Eberhard, M., Jost, J., Kälin, D. & Bitterli-Dreher, P. (2011): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1089 Aarau (Atlasblatt 135), Erläuterungen. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern (Bern).
- Jordan, P., Malz, A., Heuberger, S., Pietsch, J., Kley, J. & Madritsch, H. (2015): Regionale geologische Profile durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Fernschubdeformation im östlichen Faltenjura: Arbeitsbericht zu SGT Etappe 2. Nagra Arbeitsber. NAB 14-105.

- Madritsch, H., Schmid, S.M. & Fabbri, O. (2008): Interactions between thin- and thick-skinned tectonics at the northwestern front of the Jura fold-and-thrust belt (eastern France). *Tectonics* 27, TC5005, doi:10.1029/2008TC002282.
- Madritsch, H., Preusser, F., Fabbri, O., Bichet, V., Schlunegger, F. & Schmid, S.M. (2010): Late Quaternary folding in the Jura Mountains: evidence from syn-erosional deformation of fluvial meanders. *Terra Nova* 22, 147-154.
- 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.
- Marchant, R., Ringgenberg, Y., Stampfli, G., Birkhäuser, P., Roth, P. & Meier, B. (2005): Paleotectonic evolution of the Zürcher Weinland (northern Switzerland), based on 2D- and 3D-seismic data. *Eclogae geol. Helv.* 98, 345-362.
- Malz, A., Madritsch, H. & Meier, B. (submitted): Triangle zone formation and associated thrust front development in thin-skinned foreland fold belts: a case study from the Eastern Jura Mountains. *Tectonophysics*.
- Matter, A. (1987): Faziesanalyse und Ablagerungsmilieus des Permokarbons im Nordschweizer Trog. *Eclogae geol. Helv.* 80/2, 345-368.
- Matter, A., Peters, Tj., Bläsi, H.-R., Meyer, J., Ischi, H. & Meyer, Ch. (1988): Sondierbohrung Weiach – Geologie. Text- und Beilagenband. Nagra Tech. Ber. NTB 86-01.
- Meier, B. & Deplazes, G. (2014a): Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten. Nagra Arbeitsber. NAB 14-57.
- Meier, B. & Deplazes, G. (2014b): Reflexionsseismische Analyse des 'Braunen Doggers'. Nagra Arbeitsber. NAB 14-58
- Mosar, J. (1999): Present-day and future tectonic underplating in the western Swiss Alps: reconciliation of basement/wrench-faulting and décollement folding of the Jura and Molasse basin in the Alpine foreland. *Earth Planet. Sci. Lett.* 73, 143-155.
- Murawski, H. & Meyer Wilhelm (1998): *Geologisches Wörterbuch*. 10. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, 278 p.
- NAB 06-26: Stratigrafie, Mächtigkeit und Lithofazies der mesozoischen Formationen in der Nordschweiz. Eine Kompilation von Bohrungen, Übersichts- und Aufschlussprofilen. H. Naef. Nagra. Dezember 2008.
- NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. Textband and Beilagenband. H. Madritsch, B. Meier, P. Kuhn, Ph. Roth, O. Zingg, S. Heuberger, H. Naef, Ph. Birkhäuser. Nagra. Juni 2013.
- NAB 13-40: Gravity data in Northern Switzerland and Southern Germany. Text and Enclosures. Green, A.G., Merz, K., Marti, U. & Spillmann, T. Nagra, Wettingen. July 2013.
- NAB 14-17: Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbondtogs: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schwere-Daten. H. Naef, H. Madritsch. Nagra. Dezember 2014.

- NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011-12. Textband, Beilagen, Anhangen B. Meier, P. Kuhn, S. Muff, P. Roth, H. Madtrisch. Nagra. September 2014.
- NAB 14-57: Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten B. Meier, G. Deplazes. Nagra. Oktober 2014.
- NAB 14-58 Vorabdruck_Reflexionsseismische Analyse des „Braunen Doggers“ B. Meier, G. Deplazes. Nagra. Dezember 2014.
- NAB 14-88: Simulation of layout-determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for sub-surface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland G.W. Lanyon, H. Madtrisch. Nagra. December 2014.
- NAB 14-105: Regionale geologische Profilschnitte durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Ferschubdeformation im östlichen Faltenjura: Arbeitsbericht zu SGT-Etappe 2. P. Jordan, A. Malz, S. Heuberger, J. Pietsch, J. Kley, H. Madtrisch. Nagra. März 2015.
- NAB 17-01: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2017.
- Nagra (2012a): „Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz“ edited by G. Rybarczyk. Wettingen: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2012.
- NTB 00-03: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Ph. Birkhäuser, Ph. Roth, B. Meier, H. Naef. Nagra. August 2001.
- NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Nagra. Dezember 2014.
- NTB 14-02: Dossier I. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier I. Einleitung. Nagra. Dezember 2014.
- NTB 14-02: Dossier II. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Sedimentologische und tektonische Verhältnisse. Nagra Dezember 2014.
- NTB 14-02: Dossier III. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Geologische Langzeitenentwicklung. Nagra. Dezember 2014.
- NTB 14-02: Dossier VII SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Nutzungskonflikte. Nagra. Dezember 2014.
- NTB 14-02: Dossier VIII SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier VIII. Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit. Nagra Dezember 2014.
- Preusser, F. & Graf, H.R. (2002): Erste Ergebnisse von Lumineszenzdatierungen eiszeitlicher Ablagerungen der Nordschweiz. Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F. 84, 419-438.

- Roth, Ph., Naef, H. & Schnellmann, M. (2010): Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Wettingen: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2002.
- Reinicke, K.M. (2011): Unkonventionelles Gas – Wo liegen die Herausforderungen? Erdöl Erdgas Kohle 127/10, 340-342.
- Rybarczyk, G. (2013): Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit. Nagra Arbeitsber. NAB 13-09.
- Sommaruga, A. (1997): Geology of the Central Jura and the Molasse Basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. – *Mém. soc. neuchâteloise sci. nat.* 12, 176.
- Sommaruga, A., Eichenberger, U. & Marillier, F. (2012): Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. Text Volume. Edited by the Swiss Geophysical Commission. *Matér. Géol. Géophys.* 44, swisstopo, Wabern.
- Ustaszewski, K. & Schmid, S.M. (2007): Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction. *Swiss J. Geosci.* 100, 293-312.

ENSI 33/464

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, E-Mail Info@ensi.ch, www.ensi.ch