

Aspekte hochauflösender Reflexionsseismik im städtischen Raum

Hans-Peter Müller

ABE-geo, Delpstraße 2, D-31303 Burgdorf

Abstract

High resolution seismic survey could unveil topography of an aquiclude's top by linking its isolated geological depth profile information. Mapping the aquiclude at such shallow depths of 15 m maximum could only be achieved by applying seismic shear wave data acquisition. We decided to use horizontal SH-geophones as single receivers. Assuming an isotropic flat-layered medium, SH-wave processing could be treated similar to acoustic P-waves as was outlined by Hinds et al., (2002). During reflection and / or transmission they convert to SH-waves only, while stacking over an offset range would enhance them. Disadvantageously they evoke stronger coherent multiple reflections. Besides this, surface waves arise as Love waves but could be handled, reducing them by using the 2-fold vertical shot-gather stack according to their opposing polarities used. Taking one component SH-oriented geophones only, seemed to be acceptable for line survey, while vertical seismic profiling (VSP) demanded multi-component recording, thus acquiring 3C orthogonal component's data.

Though recording was performed at night, traffics by trams, trains, cars and even pedestrians disturbed the high resolution seismic line data, erroneously. But the main deterioration of seismic reflections from place to place caused other effects imminent at some sites: Below the seismic lines some subsurface constructions or voids, excavation trenches re-filled but without compacting the soil after it thoroughly and sufficiently not to hamper seismic quality purposes, led to the unfavorable consequences mentioned before.

3C shear wave VSP differentiates velocities in shallow depths in the well. Thus SH-VSP serves as the missing link to geology where seismic surface-based survey, alone, might fail. Exclusively, VSP delivers these information: The complete seismic wave field, the ability to separate the wave field into its downgoing and upgoing parts, the seismic image belonging to the true depths, the real interval velocities, the detection of multiple reflections and the recovery of the wavelet (Hardage, B. A. (2000)).

As data quality of the seismic surface lines remained low after offset limited stacking was applied in a first step, and depth conversion applied in a second step, deteriorating of weaker reflections occurred tearing down frequency content. Higher vertical resolution could be only expected from VSP data. Only but minor surface data of the CMP sections could be compared with high-resolution VSP data, successfully.

Einleitung

Es wird das Ergebnis einer oberflächennahen seismischen Erkundung mit Scherwellen (SH) innerhalb bebauter Umgebung vorgestellt, das eine seismische Nachbearbeitung erfahren sollte. Zusätzlich zu den Oberflächen-messprofilen wurden in deren Nähe zwei seismische Bohrlochmessungen (VSP 1 an der

Bohrung 1907 und VSP 2 am Pegel 1654) mittels einer 3-Komponentenbohrlochsonde (3-K) bis 12 bzw. 9 m Teufe vermessen. Als seismische Quelle kam ein SH-Minivibrator zum Einsatz. Hochauflösende seismische Verfahren können die Oberfläche von Bodenschichten weiträumig modellieren, indem man die Informationen einzelner isolierter lokaler Tiefenprofile im Umfeld miteinander vernetzt. Die Kartierung einer Aquiklude in Tiefen bis ca. 15 m gelingt in der Reflexionsseismik nur durch die Aufnahme mit Scherwellen. Dazu wurden SH-Einzelgeophone eingesetzt. Nimmt man eine möglichst ebene isotrope Schichtenlagerung an, so ist die Datenbearbeitung von SH-Wellen nach dem Prinzip akustischer seismischer Kompressionswellen zulässig (Hinds et al., (2002)). Hinzu kommt, dass SH-Wellen nach Reflexion und / oder Transmission wiederum in SH-Wellen konvertiert werden.

Das 3-K Scherwellen-VSP schafft auch in geringen Bohrtiefen ein detailliertes Reflexionsbild hoher Auflösung. Damit stellen die geophysikalisch gewonnenen VSP-Ergebnisse den direkten Zugang zum Verständnis geologischer Aufschlüsse her. Dies ist allein durch seismische Oberflächenmessungen selten gegeben. Nur das VSP-Verfahren ist in der Lage, direkte Informationen zum vollständigen seismischen Wellenfeld bereit zu stellen, durch dessen Separierung in einen abwärts- und aufwärts laufenden Anteil des Wellenfeldes zu erzeugen, die Gewinnung eines auf wahre Tiefenangaben bezogenen seismischen Abbildes (Image) zu gewährleisten und örtliche reale Intervallgeschwindigkeiten sowie differenzierte Angaben zu multiplen Reflexionen und zum Wavelet zu liefern (Hardage, B. A. (2000)).

Nachteilig ist aber, dass einerseits verstärkt kohärente multiple Reflexionen (Simmons et al., (2001)) in Erscheinung treten, und andererseits die in der Reflexionsseismik ebenfalls unerwünschten Oberflächenwellen in Form von Love- und Rayleigh-Wellen zusätzlich auftreten. Den Love-Wellen kann begegnet werden, wenn die Messungen auf versiegeltem oder gepflastertem Grund erfolgen. Letztere lassen sich dagegen mit geeigneter Signal-behandlung beherrschen, dadurch, dass die beiden Einzelseismogramme eines Messpunktes, gegensätzlich polarisiert, einer Vertikalstapelung in Form einer additiven Subtraktion unterzogen werden. Dabei löschen sich die auf nur einem der Seismogramme aufgetretenen inkohärenten Störsignale gegenseitig aus, während die auf beiden Seismogrammen vorhandenen Nutzsignale verstärkt werden, und letztlich zu einer verbesserten Signalqualität führen (Polom et al. (2008)).

Während für die Vermessung von SH-Linienprofilen horizontal ausgerichtete Einzelgeophone genügen sollten, sind in der bohrlochseismischen Datenaufnahme 3C-Geophone mit orthogonal angeordneten Komponenten unabdingbar. Diese befinden sich in einer speziellen Sonde, die im Bohrloch in vorgegebenen Tiefenstufen das vertikale Profil seismisch vermisst.

Fakten und Motive

Der nordöstliche Teil Basels ist zum nicht geringen Teil industriell geprägt. Der Boden bzw. das Grundwasserregime leiden noch heute am Eintrag chemischer Schadstoffe wie CKW, die einst aus Lecks defekter Rohrleitungen in nahe-gelegenen Industrieanlagen austraten oder auch auf andere Verursacher zurückgehen. Diese löslichen und schwer löslichen Bestandteile durchdrangen und verschmutzten den

Boden im Umfeld und gelangten schließlich in die Grundwasserleiter. Von ihren schwer löslichen Anteilen wird angenommen, dass sie sich in Senken am Boden der GW-Leiter in höherer Konzentration in sog. „hot-spots“ gesammelt haben. Durch das Abteufen von Beobachtungs-brunnen hatte man aus dem Monitoring nur räumlich begrenzte Erkenntnisse gewinnen können, hoffte aber, es könne gelingen, diese hot-spots weitgehend abzupumpen. An einer dieser Bohrungen im Untersuchungsgebiet wurde aber trotz fortwährenden Pumpens ein kontinuierliches Nachströmen von CKW-Bestandteilen festgestellt, und an eben dieser Lokation liegt eine der VSP-Vermessungspunkte für unsere Untersuchung in der Abb. 1 durch einen roten Kreis markiert.

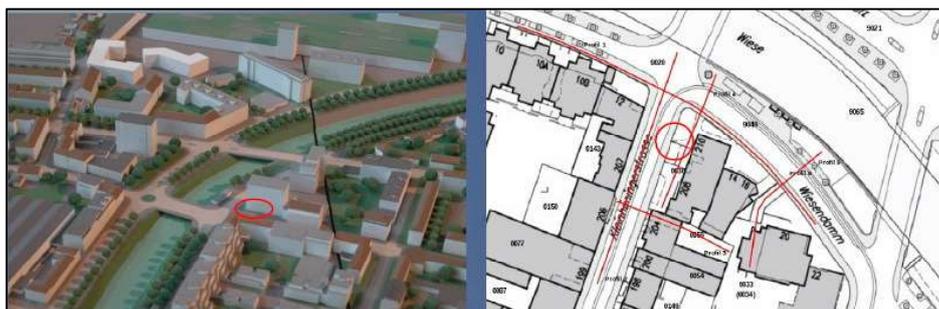


Abb. 1: Modell des Stadtteils (links); projizierte seismische Profile im Kartenausschnitt (rechts).

Randbedingungen

Die Geologie der Rheinterrasse im Alpinen Vorland wird durch die Molasse-Sedimente des Tertiärs bestimmt, die von quartären fluviatilen Sedimenten, charakterisiert, durch eine Abfolge von Sand- und Kiesschichten, den Aquifer bildend, bis ca. 4 m unter Niveau überlagert werden. Obwohl alle Messungen während der Nachtstunden erfolgten, blieb die seismische Bodenunruhe noch erheblich. Zusätzlich erschwerend kam hinzu, dass die im Profilverlauf zuvor nach Erdarbeiten erfolgte Bodenverdichtung unzureichend war, und der Qualität der seismischen Oberflächenmessungen äußerst abträglich. Darüber finden sich bis zur Erdoberfläche Fundamente nebst Bauschuttlagen; auch Hohlräume können vereinzelt vorhanden sein. Die Lage des Molassehorizonts ist nur aus vereinzelt geologischen Aufschlüssen mit Teufen zwischen 9 und 13 m bekannt. Die Geologen erwarteten ansonsten einen nahezu söhligem Verlauf des Molasse-Tops. Dies sollte mit Hilfe der SH-Seismik an dem an sich markanten Übergang zum Tertiär seismisch gut zu kartieren sein. Ziel der Untersuchung war daher die approximative Bestimmung der Tiefenlage der Aquiklude im Einzugsbereich der Messprofile (s. Abb. 1).

Datenaufnahme

Beide Messverfahren benutzten dieselbe seismische Quelle, den Scherwellen Mini-Vibrator EIVis III S8 (Beilecke et al., (2006)). Diese Quelle wurde an jedem Messpunkt zweimal durch lineare Sweeps mit gegensätzlicher Polarität im Frequenzbereich von 30 bis 240 Hz über 10 s Länge angeregt. Diese setzte sich also, am selben Messpunkt ausgeführt, aus 2 Einzelmessungen mit gegensätzlicher Polarität zusammen. Die Messauslage auf den drei zu betrachtenden seismischen Linienprofilen, BS 4, BS 2 und BS 3, bestand aus je 47 seismischen Kanälen pro Einzelaufnahme mit SM6-H 10 Hz SH-Geophonen. Die

Empfänger wurden als SH-Geophone senkrecht zur Messprofilrichtung orientiert. Der Aufnahmeeinheit, bestehend aus 2 24-kanaligen Geometrics-Geoden diente ein Notebook als Steuerungseinheit. Alle seismischen Daten wurden unkorreliert, d.h. mit 11 s Länge aufgezeichnet, zusätzlich wurde der Kanal 48 zur Speicherung des Sweeps verwendet. Eine Konfiguration, die horizontal polarisierte Scherwellen, von einer horizontal polarisierten Quelle abgestrahlt, aufgezeichnet, nennt man auch SH-SH Quelle-Empfänger-Anordnung (Polom, U. et al. (2010)). Neueste Konfigurationen verfügen quellseitig über die Option, den aktuell erzeugten Sweep (also kein synthetisch erzeugtes uniformes Signal) zum Triggerzeitpunkt der Aufnahme angepasst, auszusenden. Infolge dessen lassen sich eventuelle Qualitätsunterschiede in den Aufnahmen nachträglich korrigieren (**Krawczyk et al. (2017)**). **Die letztere Möglichkeit bestand aber bei den hier beschriebenen Arbeiten in Basel leider noch nicht.**

Im Bohrloch kam eine Geostuff BHG-2 3-K Bohrlochsonde zum Einsatz, ausgerüstet mit einer Klemmvorrichtung zur Fixierung an der Bohrlochwand während des Messvorgangs. Die Sonde ist mit einer Vorrichtung zur Aufnahme der 3-K Geophone, orthogonal aufgehängt ausgestattet. Ein eingebauter Kompaß sorgt für die Ausrichtung der Aufnahmeeinheit in Nordrichtung. Die Quelle erzeugte auch hier, wie oben beschrieben, zwei Sweeps in gleicher Konfiguration (mit gegensätzlicher Polarität). Die Datenaufnahme wurde mit einer 24-Kanal Geometrics-Geode bewerkstelligt, so dass 23 seismische Spuren und der Sweep (auf Kanal 24) gespeichert wurden.

Messparameter

In der Linienseismik betragen die Schuss- und Geophonabstände 0,5 m, bei den Schussabständen allerdings erst nach Änderung der Geometrie der Messauslage. Gemessen wurde im „Roll-along“-Verfahren, um eine möglichst gleichförmige Untergrundüberdeckung sicher zu stellen. Die geringen Messpunktabstände dienten dazu, eine hohe horizontale Auflösung in den Daten, verbunden mit einer bis zu 40-fachen Überdeckung zu erreichen, um die bekannten ungünstigen Messbedingungen zu kompensieren.

Die VSP 1-Messung wurde im Beobachtungsbrunnen 1907 vorgenommen, die Sonde in den Brunnen eingebracht, und die Messungen in den Messteufen von -1,35 m ab Bohrlochmund bis zur Endteufe von -12,85 m mit Abstand von 0,5 m ausgeführt. Insgesamt wurden 22 Messniveaus erfasst. Dazu war die Sonde an jedem Messpunkt fixiert und ausgerichtet, bevor sie nach jeder Einzelmessung um jeweils 0,5 m vertikal verfahren wurde. Die seismische Quelle stand an der Oberfläche 1,5 m seitwärts des Bohrlochs. Zu Kontrollzwecken war ein weiteres 3-K Geophon neben dem Bohrlochmund installiert. Die VSP 2-Messung umfasste 19 Niveaus von -0,85 bis -10,85 m. Näheres enthält die Tab. 1.

General recording parameters	Surface recording special parameters	VSP ZO recording special parameters
Sampling interval 1 ms		
Recording length 11 s	uncorrelated	uncorrelated
47 transverse horizontal (SH) receivers mounted on streamer. Interval 1 m	Geophone distance 0.5 m	Downhole interval 0.5 m
Source signal 30-240 Hz, tapered linear sweep, duration 10 s	Source interval 0.5 m	Single source location
2 sweeps of opposing polarities at each source location	0° & 180°	0° & 180°

Tab. 1: Messparameter der seismischen Verfahren

Ergebnis der Linienseismik nach konventioneller Bearbeitung

Abb. 2 zeigt das Stapelprofil (Laufzeitdarstellung) des Profils BS 4 nach konventioneller Bearbeitung. Auf der Abszisse aller folgenden Laufzeit-darstellungen sind die CMP-Spuren der Stapelversionen der Profile abgebildet, die Ordinate gibt jeweils die Laufzeit (2-Wegelaufzeit) in ms an.

Der Einfluss aller unmittelbar unter der Erdoberfläche bestehenden Boden-anomalien und durch Bodenunruhe verursachten Störeffekte, die während der Messungen auftraten, bestimmt das Reflexionsbild, das durch schwach ausgeprägte, vereinzelte Reflexionssegmente in den oberen 100 ms bestimmt wird. Markante söhliche Reflektoren (Zielhorizonte) sind in diesem Bereich nicht auszumachen, vielmehr scheinen sie durch die oberflächennahen Effekte maskiert. Die konventionelle Bearbeitung führt hier also offensichtlich nicht zum Erfolg.

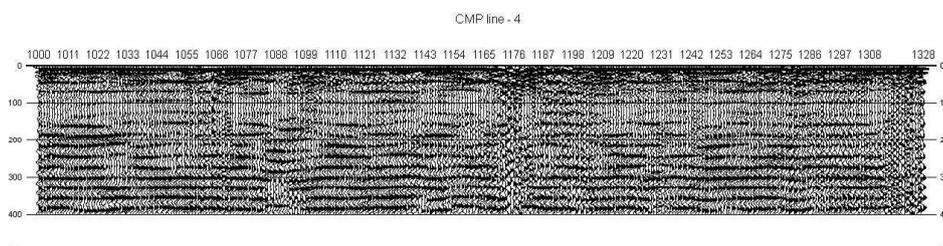


Abb. 2: Stapelergbnis des Profils BS 4 nach konventioneller Bearbeitung.

Ergebnisse der VSP-Bearbeitung

Das VSP-Verfahren liefert einen eigenständigen, unabhängigen Lösungs-ansatz, da nur aus dem VSP die wahren tiefenabhängigen Intervall-geschwindigkeiten im Bereich der Bohrung abgeleitet werden. Die Information ist auch geeignet, die Stapelgeschwindigkeiten der Linienprofile im Bereich der VSP-Messpunkte besser abzuschätzen. Wie von Brewer (2000) für P-Wellen ausgeführt, gelingt mittels VSP-Ergebnissen, eine qualitative Verbesserung sowohl bei oberflächenbasierten Stapelungen als auch bei deren in Tiefen gewandelten Sektionen.

Die VSP-Graphiken der Abb. 3 zeigen in anschaulich, kompakter Form für beide VSP-Messungen das anteilige abwärts- bzw. aufwärts laufende Wellenfeld. In den x/t-Seismogrammen sind auf der Abszisse

die CMP-Spuren an den Messniveaus von links mit zunehmender Messteufe angeordnet, die Ordinate gibt die 2-Wegelaufzeit t an. In der linken Spalte sind die abwärts laufenden Wellenfelder des VSP 1 (oben) bzw. VSP 2 (unten) zu sehen, die rechte Spalte zeigt das aufwärts laufende Wellenfeld beider VSP.

Die x/t -Diagramme der rechten Spalte bilden direkt die Reflektoren aus den separierten aufwärts gerichteten Wellenfeldern für beide VSP gemessenen Laufzeiten ab. Das VSP 1-Ergebnis (oben) weist mehrere Reflektoren auf, deren erster, schwächerer bei 65 ms auftritt, gefolgt von einem kräftig ausgeprägten bei 75 ms, und vorerst als Zielhorizont interpretiert wird. Eine Reflexionsfolge beginnt darunter bei 90 ms mit einem Maximum um 120 ms. Das VSP 2-Ergebnis (unten), weist ebenfalls mehrere Reflektoren auf, beginnend bei 45 ms, gefolgt vom stärksten Einsatz bei 60 ms und einem etwas schwächeren bei 65 ms. Dem schließt sich hier, wenn auch ein wenig schwächer als im VSP 1, eine Reflexionsfolge ab 80 bis ca. 95 ms an. Die Reflektoren der unteren Reflexionsfolgen beider VSP, die erst bei größeren Messteufen einsetzen, können als unter der Endteufe der Vermessung (-12,85 bzw. -9,85) liegend interpretiert werden, d. h. dass diese Reflexionen die Sondenempfänger aus größeren Tiefen erreichten. Die Diskrepanz zwischen dem möglichen Zielhorizont im VSP 1 mit 75 ms gegenüber dem des im VSP 2 projizierten Horizonts um 60 bis 65 ms, kann wohl dadurch aufgelöst werden, dass die Sonde des VSP 2 den Zielhorizont nicht durchteuft hatte.

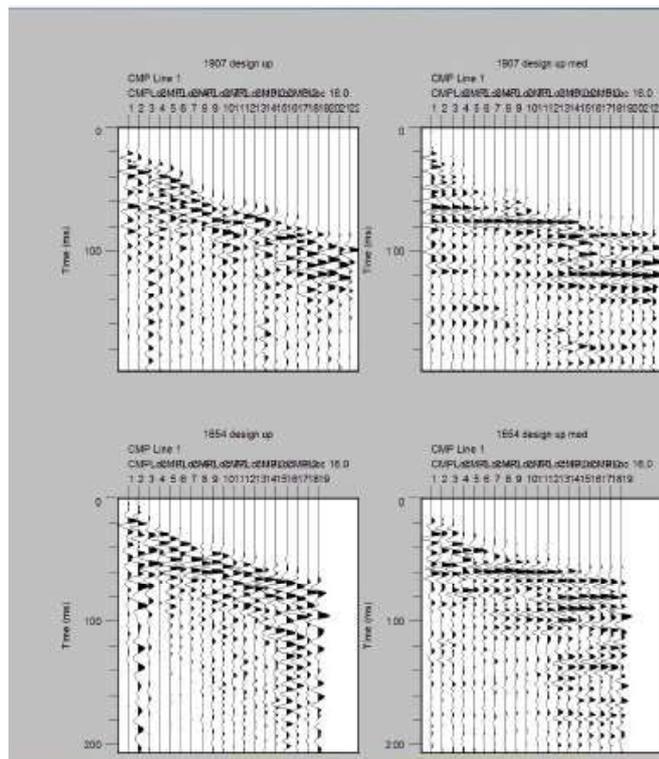


Abb. 3: Seismogramme, Spalte 1: Separierte abwärts laufende Wellenfelder von VSP 1 bzw. VSP 2. Spalte 2: Separierte aufwärts laufende Wellenfelder der VSP.

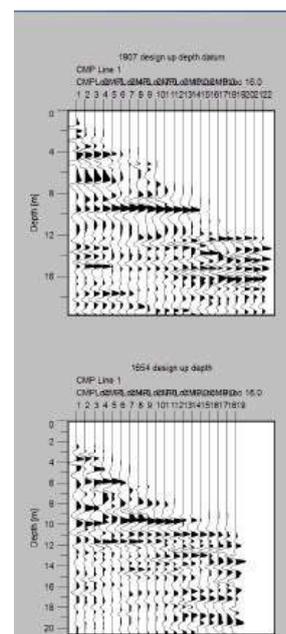
Die Reflektoren in den Tiefenprofilen (Abb. 4) erlauben die direkte Zuordnung zu den geologisch erbohrten Schichtgrenzen, denn sie bilden die Reflexionen in den wahren Tiefen ab. Die x/z -Seismogramme zeigen in Abb. 4 auf der Abszisse die CMP-Spuren an den Messniveaus von links mit zunehmender Messteufe angeordnet, die Ordinate gibt die wahre Teufe z an.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden teufengerechten x/z -Seismogramme gemeinsam interpretiert. Nur im VSP 1 ist ein von der direkten Welle hervorgerufenen Ereignis bis -4,5 m auszumachen, das als die Grundwasser-oberkante des Aquifers interpretiert wird (s. Auch Abb. 10). Auf beiden Seismogrammen erkennt man bei -9,5 m den stärksten Reflektor, der als möglicher Zielhorizont interpretiert vorerst wird. Darunter differenziert sich das Bild, je nachdem, ob man das VSP 1 oder das VSP 2 betrachtet: VSP 2 zeigt einen Mehrfacheinsatz zwischen -11 bis 11,5 m (vergl. dazu den Doppeleinsatz bei 60 bis 65 ms im x/t -Seismogramm), dessen Entsprechung sich im VSP 1 erst unterhalb -12 m andeutet. Die nächsttieferen seismischen Einsätze finden sich im Bereich -13 bis -16 m bzw. -18 m. Inwieweit letztere in Teilen als Multiplen angesehen werden müssen, ist nicht zu entscheiden.

Überlegungen zur Lage des Zielhorizonts

Wo liegt nun der Zielhorizont wirklich? Betrachtet man den Tiefenbereich beider VSP genauer unter dem Aspekt ihrer Reflexionsqualität, und zwar in einer Zone von -9 m und -12 m, so ist das Reflexionsbild unterhalb -9,5 m, also dem ersten, markanten Ereignis in den Seismogrammen, doch qualitativ erstaunlich unterschiedlich. Der sogenannte Zielhorizont in -9,5 m im VSP 1 zeigt einen gekrümmten Verlauf, der auf eine unterkorrigierte dynamische Korrektur hinweist. Die nachfolgende reflexionsarme Zone im VSP 1 stützt diese Annahme. Ihr steht im VSP 2 ein deutlich gegliedertes, detailreiches Bild mit den Einsätzen im Tiefenbereich um -11 m gegenüber. Die beiden angewandten Intervallgeschwindigkeits-Profile treffen für den gemeinsamen Reflektor bei -9,5 m nicht ganz zu, was sich vor allem beim VSP 1 so nachteilig auswirkt, dass jegliche Feingliederung ab -10 m Teufe unmöglich wird, im VSP 2 aber dennoch, wenn auch abgeschwächt, erhalten bleibt. Es ist davon auszugehen, dass nicht ganz zutreffende Geschwindigkeitskorrekturen zumindestens beim VSP 2 es nicht vermochten, den Reflektor bei -11 m gänzlich auszulöschen. Zudem liegen beide VSP-Meßstellen weniger als 50 m voneinander entfernt. Daher der Entschluss, den Zielhorizont nunmehr bei -11 m zu postulieren. Nicht auszuschließen ist, dass die zweite Reflexion bei -11,5 m auf Reverberation zurückgeht.

Abb. 4: Seismogramme der aufwärts laufenden Wellenfelder von VSP 1 (oben) bzw. VSP 2 (unten) nach Tiefenwandlung.



Ergebnisse der Linienseismik mit offsetbeschränkter Bearbeitung

Es liegt nunmehr für eine Nachbearbeitung nahe, durch eine angepasste Offset-Limitierung das konventionell erstellte Stapelprofil der Abb. 2 zu optimieren. Alle Stapelungen basierten auf dem einen, in Abb. 5 dargestellten Geschwindigkeitsgesetz, das niedrigste Intervallgeschwindigkeiten von 180 m/s zwischen 50 und 140 ms besitzt. In einem Geviert von 120 m x 50 m Kantenlänge wurden alle Profile mittels dieses einfachen, generalisierten Geschwindigkeitsmodells dynamisch korrigiert. Das Ergebnis der Stapelung in Abb. 6 zeigt das Profil BS 4 nach Offsetbeschränkung. Zum Vergleich betrachte man das eingeblendete VSP 1-Ergebnis unter Annahmen des zuvor im Abschnitt Gesagten, den Zielhorizont bei 11 m Tiefe entsprechend ca. 80 bis 90 ms festzulegen. Die Übereinstimmung mit dem VSP 1 ist erst unterhalb 120 ms deutlich erkennbar, also weit unterhalb des Ziel- oder Aquikludenhorizonts.

Allen Tiefenschnitten gemeinsam ist ein sehr niederfrequentes Reflexionsbild. Der Tiefenschnitt des Profils BS 4 (Abb. 7) zeigt in den CMP-Abschnitten 1190 bis 1230, um 1250 um 1260 und zwischen 1280 und 1300 die geforderte Übereinstimmung, allerdings ausschließlich mit dem vormaligen Zielhorizont bei -9,5 m. Das vollständige Stapel- und Tiefen-Profil BS 4 findet man im Anhang. BS2 (Abb. 8) bietet keine Vergleichsmöglichkeit, zeigt aber dieselben Charakteristiken. Im Profil BS 3 (Abb. 9) bestätigt sich erneut die Übereinstimmung mit dem Reflektor bei -9,5 m, zudem findet sich ein starker, teils söhligler Reflektor auf -15 m, der mit der tieferen Reflexionsfolge im VSP 2 (-13 m bis -18 m) korreliert werden kann. Insgesamt filtert der Tiefenwandlungsprozess eventuell vorhandene, höherfrequente Anteile im Wellenfeld der Linienseismik.

Die zuvor getroffene Festlegung des Zielhorizonts in 11 m Tiefe an der VSP 1-Messposition auf dem Profil BS 4 (CMP 1268) erfährt durch den geologischen Aufschluss unerwartete Unterstützung. Wie in Abb. 10 dargestellt, durchteufte die Bohrung 1907 die GWL-Oberfläche bei 4,5 m Teufe, und die Oberkante des Tertiärs (Top-Molasse) bei -12,5 m. Nur in den seltensten Fällen stimmen bekanntlich geologische Aufschlusstiefen mit den geophysikalisch gemessenen überein, so dass eine Abweichung von etwas mehr als 1 m kein schlechtes Erdurchaus befriedigend ist. Eine entscheidende Verbesserung der Ergebnisse durch nachbearbeitete Oberflächenseismik konnte wohl doch aufgrund der vorliegenden Mängel in der Datenqualität nicht erwartet werden. Dazu bedarf es eingehender Untersuchungen und detaillierter Geschwindigkeitsanalysen.

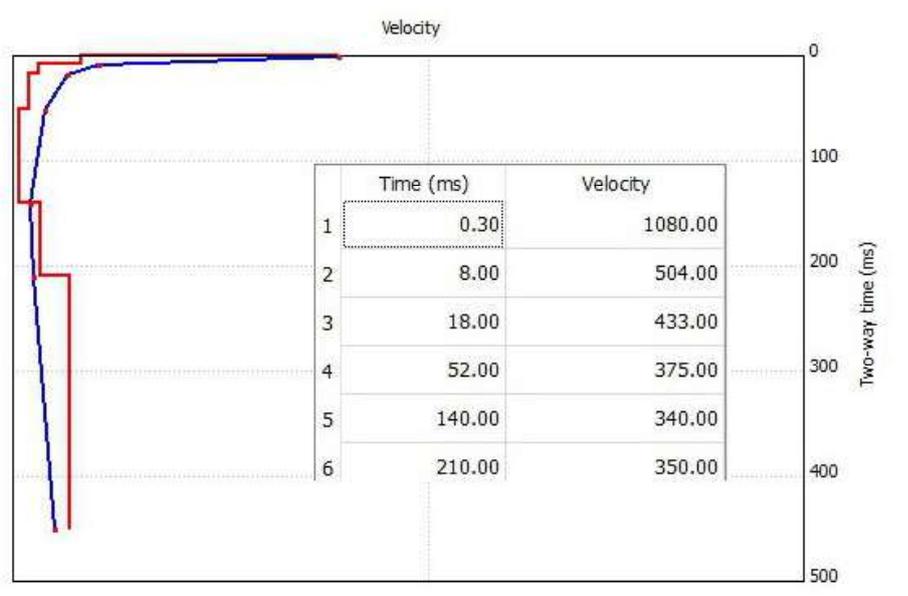


Abb. 5: Generalisiertes Geschwindigkeitsmodell nach der oberflächenseismischen Bearbeitung; die blaue Kurve und die Tabelle zeigen den Stapelgeschwindigkeits-verlauf, die rote Linie die sich ergebenden Intervallgeschwindigkeiten nach DIX.

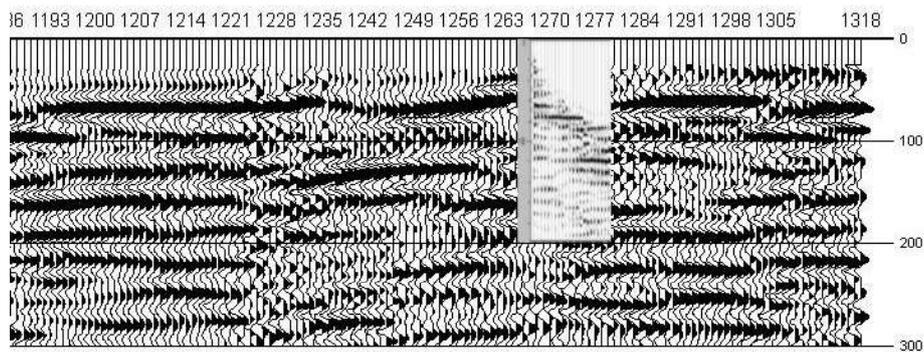


Abb. 6: Offsetbeschränktes Stapelergebnis (Ausschnitt) des Profils BS 4 mit Laufzeit-Seismogramm des VSP 1.

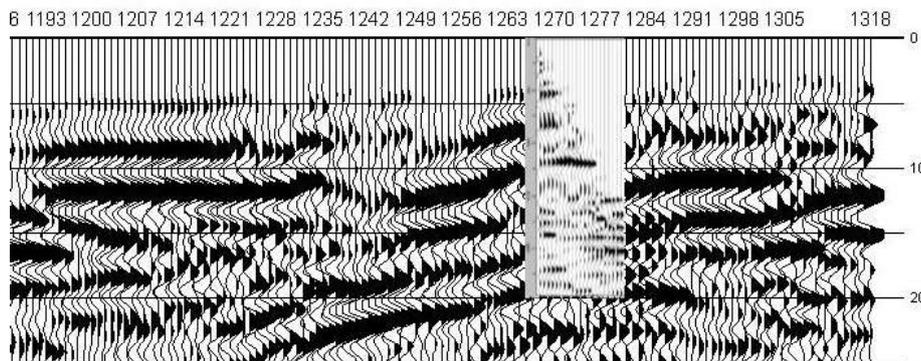


Abb. 7: Offsetbeschränktes, tiefengewandeltes Stapelergebnis (Ausschnitt) des Profils BS 4 mit Tiefen-Seismogramm des VSP 1.

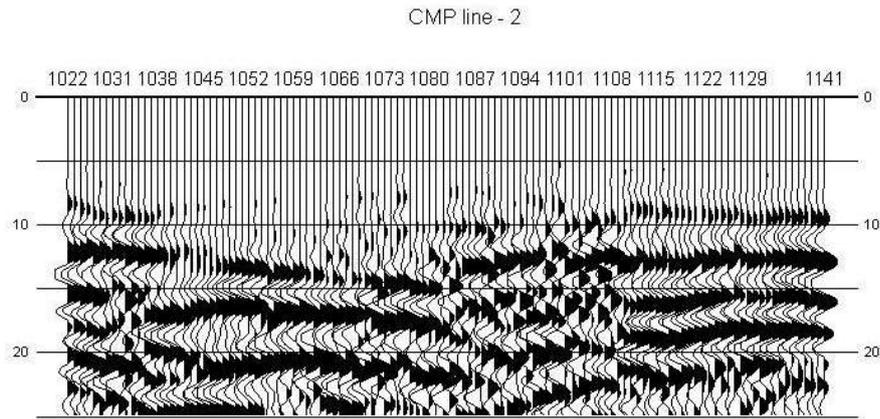


Abb. 8: Offsetbeschränktes, tiefengewandeltes Stapelergebnis des Profils BS 2.

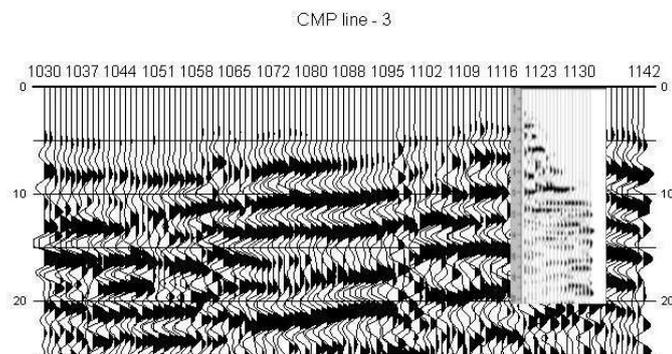


Abb. 9: Offsetbeschränktes tiefengewandeltes Stapelergebnis des Profils BS 3 mit Tiefen-Seismogramm des VSP 2.

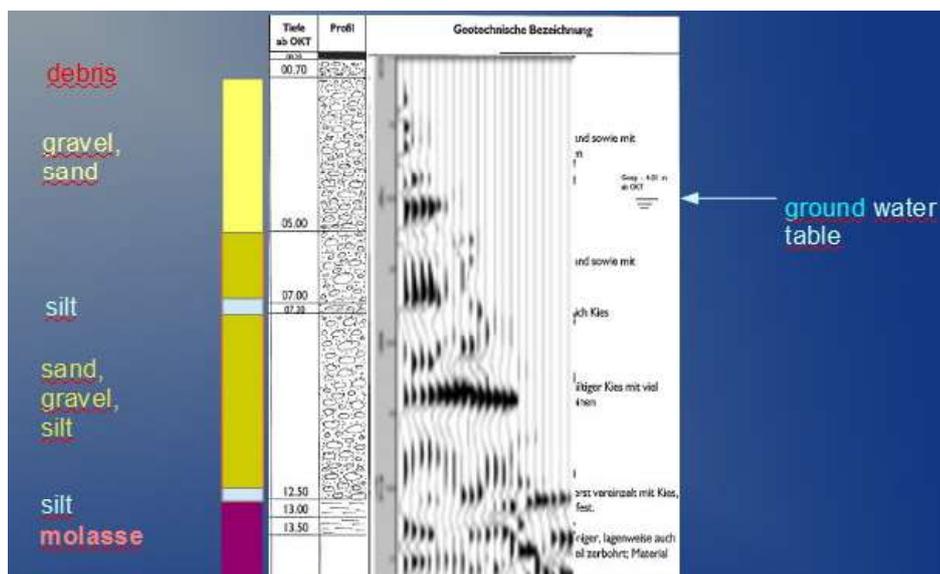


Abb. 10: Teufenabgleich des geologischen Aufschlusses 1907 mit dem VSP1-Ergebnis.

Referenzen

Beilecke, T., Polom, U. (2006): Efficient high resolution subsurface shear wave reflection imaging in sealed urban environment. A033; Near Surface 2006 Helsinki Finland.

Brewer, R. J. (2000): VSP survey meets accuracy demands. Editor's note; Geophysical corner. http://www.aapg.org/explorer/geophysical_corner/2000/gpc03.cfm.

Hardage, B. A. (2000): Vertical seismic profiling: Principles 3rd updated and revisited edition; Handbook of seismic exploration vol.14; Pergamon press.

Hinds, R. C., Kuzmiski, R. (2002): VSP – The Link between Geology and Geophysics; Search and Discovery Article #40080: Adapted for online presentation from the article by the authors in AAPG explorer (January, 2000), entitled „VSP Links Geology, Geophysics“.

Hofstede, C., Diez, A., Eisen, O., Polom, U. (2017): Shallow Seismic on Top of the European Roof – A Vibroseismic Experiment on Firn and Ice at Colle Gnifetti - Vortrag & Ext. abstract A002, 73rd EAGE Conference & Exhibition, Vienna, Austria, 23-26 May 2011, ISBN 978-90-73834-12-5

Krawczyk, C.M., Polom, U. (2017): Shear-wave seismics - a surveying tool for paved surfaces and urban areas that closes the gap to GPR measurements. Expanded Abstract, EAGE Workshop: Geophysics in support of infrastructure planning, 03.09.2017, Malmö, Sweden.

Polom, U., Beilecke, T. (2008): S-wave Reflection Seismic Exploration of a Shallow Sediment Body A Case Study at Alfbach Valley, Vulkaneifel, Germany. (from: Earth-Doc 10153.pdf)

Polom U., Hansen L., Sauvin G., L'Heureux J.-S., Lecomte I., Krawczyk C.M. et al. 2010.) High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway. In: Advances in Near-Surface Seismology and Ground-Penetrating Radar, (eds R.D. Miller, J.D. Bradford and K. Holliger), pp. 75-92. SEG, Tulsa.

Pugin, A. J.-M., Brewer, K., Cartwright, T., Pullan, S. E., Didier, P., Crow, H., Hunter, J. A. (2013): Near surface S-wave seismic reflection profiling – new approaches and insights. First Break 31, 49-60.

Simmons, J., Backus, M. (2001): Shear waves from 3-D-9-C seismic reflection data. Have we been looking for signal in all the wrong places? The Leading Edge, 20, no. 6, 604-612.

Yilmaz, O (1987): Seismic Data Processing; Investigations in Geophysics, vol. 2; SEG, 468-469.