

**GEOFYSIKALISCHE VORAUSBESTIMMUNG DER
AUFREISSBARKEIT VON FELSGESTEINEN**

GEOTEST AG, ZOLLIKOFEN

Sachbearbeiter: Dr.H.R. Keusen, Geologe

H.Zeindler, dipl.Ing.ETH

Forschungsauftrag 26/77

der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute

Januar 1982

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wahl der wirtschaftlichsten Trassé- und Aufbauvarianten, die Aufstellung realistischer Ausschreibungsunterlagen und die reibungslose Abrechnung hängen im wesentlichen Masse ab von einer eindeutigen Klassierung der Böden und Festgesteine bezüglich ihrer Abbaubarkeit. Die Grenzen dieser Abbaubarkeits-Klassen sollen zudem schon im Projektstadium bestimmbar sein.

Ende der 50-er Jahre schien dank der Anwendung refraktionsseismischer Methoden der entscheidende Fortschritt in der Abbaubarkeits-Klassierung der Festgesteine gelungen zu sein. Bald zeigte es sich jedoch, dass die seismische Wellengeschwindigkeit allein noch keine verlässliche Beurteilung erlaubte.

Unser Forschungsziel war es daher, zusätzlich zur Seismik ergänzende, leicht zu bestimmende und typische geologische Parameter zu finden. In der Folge wurden auf 63 Baustellen

- die geologischen Verhältnisse
- die p-Wellen-Geschwindigkeiten
- die Abbauleistungen der eingesetzten Geräte

ermittelt.

27 Baustellen lagen in Molassegesteinen, 21 in Jurakalk und 15 in Moräne. (Die Auswahl der Gesteine wurde durch die verfügbaren Baustellen stark beeinflusst).

Die Forschungsarbeiten gestatteten folgende Schlüsse:

Die Abbaubarkeit eines Felsen wird entscheidend nur von wenigen Felsparametern bestimmt. Es sind dies:

- a) die Verbandsfestigkeit des Gesteins und
- b) das Gefüge des Gebirges

Bezüglich der Abbaubarkeit ist es möglich, die Gesteine je nach Eigenschaften gemäss a) und b) in drei Gebirgstypen zu klassieren:

Gebirgstyp I : Isotrop-weiche Felsarten
(Vertreter : Moräne, weiche Nagelfluh,
weiche massige Sandsteine, weiche Tuffe u.ä.)

Gebirgstyp II: Anisotrop-weiche Felsarten
(Vertreter : Molasse-Sandsteine und
Mergel des Mittellandes,
weiche Gesteine des Jura und der Alpen)

Gebirgstyp III: Rigid-harte, isotrope bis anisotrope Felsarten
Vertreter : Kalke des Jura und der Alpen,
harte Sandsteine, Konglomerate und Breckzien
der Subalpinen Molasse und des Flysch, Granite,
Gneise und andere Kristallingesteine).

Für die Gebirgstypen I und II genügt die Kenntnis der

P-Wellengeschwindigkeit des Gebirges

für die Beurteilung der Abbaubarkeit.

Für Gebirgstyp III sind zur Klassierung

- Auflockerungsgrad $A = 1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$
- Kluftdichte
- Kluftabstand

zu ermitteln.

Mit diesen einfach zu bestimmenden Felskennwerten können Abbaubarkeits-Klassen ohne Bezug zu Maschinentypen charakterisiert und gegeneinander abgegrenzt werden. Als Benennung wird vorgeschlagen:

- Leichter Boden
- Schwerer Boden
- Leichter Fels
- Schwerer Fels

Das breitabgestützte Modell kann die Grundlage für eine Normierung bilden.

Die erwähnten Felskennwerte sind im Stadium der Voruntersuchung und Projektierung bestimmbar. Sie können auch während der Bauausführung überprüft werden. Entsprechende Baustellen-Untersuchungs-Methoden sind noch zu entwickeln.

- ZUSAMMENFASSUNG

- INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Vorgeschichte, Ablauf der Forschungsarbeiten	1
1.2	Zielsetzung	4
2.	BISHERIGE ANSAETZE ZUR CHARAKTERISIERUNG VON FELSGESTEINEN IM HINBLICK AUF DEREN ABBAUBARKEIT	5
3.	GRUNDLAGEN DER CHARAKTERISIERUNG VON FELS	9
3.1	Allgemeines zur Beschreibung von Fels	9
3.11	Die Begriffe "Gestein" und "Gebirge"	9
3.12	Anisotropie und Inhomogenität des Gebirges	9
3.2	Materialeigenschaften	14
3.21	Gesteinseigenschaften	14
3.22	Gebirgseigenschaften	16
3.221	Gefügeflächen	16
3.222	Auflockerungsgrad	18
4.	EIGNUNG UND WAHL VON FELSKRITERIEN FUER REISSBARKEITSPROGNOSEN	19
4.1	Anforderungen an die Kriterien	19
4.2	Aussagekraft und Anwendbarkeit von Felskriterien für Reissbarkeitsprognosen	19
5.	METHODIK ZUR ERMITTLUNG DER FELSKRITERIEN IM HINBLICK AUF REISSBARKEITSPROGNOSEN	23
5.1	Die seismische Ermittlung der Verbandsfestigkeit (Interpretation von P-Wellen-Geschwindigkeiten)	23
5.11	Seismische Verfahren	23
5.111	Generelle Bemerkungen	23
5.112	Refraktionsseismik als Hauptmethode	24
5.113	Bohrlochmethoden (well-shooting)	27
5.12	P-Wellengeschwindigkeit und Auflockerungsgrad rsp. Porosität	28

5.2	Die Beschreibung der Gefügeverhältnisse	31
5.21	Die Kluftdichte	31
5.22	Der Kluftabstand	32
5.33	Die räumliche Lage der Klüfte	35
5.34	Notwendige Aufschlüsse für die Untersuchung der Gefügeverhältnisse	35
6.	AUSWERTUNG VON BAUERFAHRUNGEN	37
6.1	Auswahl der Baustellen	37
6.2	Ausgeführte Untersuchungen	37
6.3	Untersuchte Felsarten	38
6.31	Allgemeines	38
6.32	Beschreibung der Felsarten	38
6.321	Felsart I, quasi-isotrop: Moräne, Nagelfluh	38
6.322	Felsart II, anisotrope Weichgesteine Mittelländische Molasse - Sandsteine und -Mergel	40
6.323	Felsart III, anisotrop-rigid: Jura-Kalke	42
6.4	Zusammenhang zwischen P-Wellengeschwindigkeit und Reissbarkeit	44
6.41	Allgemeines	44
6.42	Felsarten I und II: Moräne und Mittelland-Molasse	46
6.43	Felsart III: Jurakalk (anisotrop-rigid)	49
6.5	Zusammenhang zwischen seismisch ermitteltem Auflockerungsgrad und der Reissbarkeit	50
6.6	Zusammenhang zwischen Kluftdichte und Reissbarkeit	51
6.7	Zusammenhang zwischen Kluftstellung und Reissbarkeit	55
6.8	Maschinenabhängigkeit	55
7.	ZUSAMMENFASSUNG	56
8.	FOLGERUNGEN	60
8.1	Anforderungen an Klassen-Abgrenzungen und Vorschlag für Klasseneinteilung	60
8.2	Vergleich mit vorhandenen Normen	62
9.	AUSBLICK	63
	LITERATURVERZEICHNIS	

ANHANG

- | | |
|---------|--|
| 1 | Untersuchte Baustellen, Uebersicht |
| 2 - 9 | Tabelle 9: Untersuchte Baustellen
Geologie, Geophysik und Bauerfahrung |
| 10 - 11 | Tabelle 10: P-Wellengeschwindigkeiten V_{Geb} und V_{Gest}
und Kluftdichte der untersuchten Kalke |

ANNEX

- Situationen und Profile der untersuchten Baustellen
Massstab von 1:500 oder 1:1000

(Dieser Annex kann beim Sekretariat der VSS, Seefeldstrasse 9, Zürich, eingesehen werden. Kopien sind zum Selbstkostenpreis erhältlich bei der Forschungsstelle Geotest AG, Birkenstrasse 15, 3052 Zollikofen).

 VERZEICHNIS DER TABELLEN UND FIGUREN

			<u>Seite</u>
Figur	1	Korrelation von seismischer Geschwindigkeit und Abbauleistung resp. Abbaukosten nach CHURCH (1965)	5
Figur	2	Reissbarkeit verschiedener Gesteinsarten in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit, nach CATERPILLAR(1966)	6
Tabelle	1	"Rippability rating chart" nach WEAVER (1975)	8
Tabelle	2	Wichtigste Gesteins- resp. Gebirgseigenschaften im Hinblick auf die Abbaubarkeit von Fels	9
Figur	3	Quasi-isotropes Gebirge	11
Figur	4	Anisotropes Gebirge	12
Figur	5	Inhomogener Gebirgsaufbau durch Wechselagerung verschiedener Gesteine	13
Figur	6	Räumliche Festlegung flächiger Elemente	17
Figur	7	Wirkungsbereich eines Rippers	20
Tabelle	3	Anwendbarkeit von Felskriterien für Reissbarkeitsprognosen isotroper und anisotroper Gebirgstypen	21
Figur	8	Ergebnisse von Oberflächenseismik und Well-shooting in einem inhomogenen Molasse-Gesteinskomplex.	26
Figur	9	Aufzeitschiessen und Well-shooting	27
Figur	10	Korrelation von seismisch ermitteltem Auflockerungsgrad und Porosität nach WYLLIE	29
Figur	11	Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen in Abhängigkeit von der Messrichtung in einem tektonisch anisotropen Gesteinskomplex	31
Figur	12	Baustelle Olten: Kluftdichtenuntersuchung	33
Figur	13	Baustelle Olten: Beobachtete Kluftabstände	34
Tabelle	4	Baustelle Olten: Kluftabstände	34
Figur	14	Ergebnisse von Oberflächenseismik und Well-shooting in einem praktisch homogenen und isotropen Moräne-Gesteinskomplex	41
Figur	15	Korrelation von Raumgewicht und P-Wellengeschwindigkeit der Gesteinsmatrix von Moräne, Molassegestein und Jurakalk.	43

VERZEICHNIS DER TABELLEN UND FIGUREN (Fortsetzung)

Figur	16	Abbaubarkeit und Gebirgs-P-Wellengeschwindigkeit von Moräne und Molassegesteinen	45
Figur	17	P-Wellengeschwindigkeit des Gebirges und Abbaubarkeit	48
Figur	18	Beziehung von P-Wellengeschwindigkeiten Gebirge/Gestein und Kluftdichte	49
Figur	19	Auflockerungsgrad und Abbaubarkeit anisotrop-rigider Gebirge	52
Figur	20	Korrelation von Auflockerungsgrad und Kluftdichte resp. mittlerem Kluftabstand	53
Tabelle	5	Klassifikation von Fels im Hinblick auf die Abbaubarkeit Felskennwerte für die Prognose der Abbaubarkeit	58
Tabelle	6	Bestimmung der Abbaubarkeitsklassen vor (Prognose) und während der Bauausführung	61
Tabelle	7	Vergleich der heute gebräuchlichen schweizerischen und deutschen Normen mit neuem Vorschlag für die Klasseneinteilung	62
			63

VORWORT DER VERFASSER

Unsere Forschungsarbeiten, insbesondere die geologischen und geophysikalischen Erhebungen auf den Baustellen konnten nur mit der zuvorkommenden Hilfe aller zuständigen Amtstellen und Unternehmungen zu einem erfolgreichen Ende geführt werden. Insbesondere sind wir dafür den Autobahn- und Tiefbauämtern der Kantone Appenzell, Bern, Freiburg, Graubünden, Solothurn, Thurgau, Zug und Zürich sowie der Société de l'autoroute Paris - Lyon zu Dank verpflichtet. Die Herren Dr. E. Scheller, P. Holub, C. Bruneau (alle Geotest) waren für eine methodisch einwandfreie Beschaffung und Auswertung der seismischen Daten besorgt.

1. EINLEITUNG

1.1 Vorgeschichte, Ablauf der Forschungsarbeiten

Der intensive Ausbau des Schweizer Nationalstrassennetzes in den 60-er Jahren mit seinen umfangreichen Erdbewegungen und Felsabträgen bewirkte eine Intensivierung der Suche nach möglichst zuverlässigen Methoden für die Prognose der Baugrundverhältnisse. Die Wahl der wirtschaftlichsten Trassé- und Ausbauvarianten sowie die Aufstellung realistischer Ausschreibungsunterlagen erwies sich ohne gründliche Baugrundkenntnisse, insbesondere auch ohne Kenntnisse der Abbaubarkeit von Felsgestein, als unmöglich. Ganz besonders fehlten die Grundlagen, um die Möglichkeit eines Abtrages durch Aufreißen im Voraus erkennen zu können.

Zwar hatte die Firma Caterpillar bereits Ende der 50-er Jahre Tabellen (Seite 6) herausgegeben, in welchen die Aufreissbarkeit (Rippability) verschiedener Felsarten als Funktion der seismischen Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit und des Traktortyps angegeben wurde. Es zeigte sich jedoch, dass die in den USA gesammelten Erfahrungen nicht ohne weiteres auf gleichnamigen Fels anderer Kontinente übertragen werden konnten. Zudem schien es offensichtlich, dass die Aufreissbarkeit auch von Faktoren beeinflusst wird, die sich in der Wellengeschwindigkeit nicht manifestieren (z.B. Charakter der Zerklüftung, Verbandsfestigkeit).

Wir kamen daher zur Ueberzeugung, dass an einer repräsentativen Auswahl von projektierten Baustellen mit Abträgen im Uebergangsbereich Lockergestein/Fels folgende Studien vorzunehmen wären:

- Geologisch-geotechnische Voruntersuchung, insbesondere
 - geologische Erkundung bezüglich Gesteinstyp, Bankung, Klüftung, Verwitterung
- Messung der P-Wellen-Geschwindigkeit

- Auswertung der Bauerfahrungen
- Eingesetzte Abtraggeräte
- Abbau-Leistungen

Aufgrund dieses Konzeptes beantragten wir im Jahre 1967 erstmals einen Forschungskredit. Dieser Antrag wurde von der VSS-Koordinationskommission 2 jedoch abgelehnt. Ein erneutes Gesuch im Jahre 1969 fand dann Zustimmung und führte am 9.4.1970 zum

Forschungsauftrag 4/70 (Kredit Fr. 54'000.--)

Eigentliche Grossversuche an ausgewählten, durch klare Randbedingungen ausgezeichneten Versuchsstellen wären an sich wünschbar gewesen, kamen jedoch aus finanziellen Gründen nicht in Frage. So mussten unsere Studien in den Rahmen von Bauarbeiten eingegliedert werden, für welche der Grossteil der Voruntersuchungen vom Bauherrn übernommen wurde und für welche die Aushubarbeiten im Zuge der normalen Bauarbeiten durch die Unternehmung vorgenommen wurden. Dem Vorteil, dass die eigentlichen Forschungskosten recht niedrig gehalten werden konnten, standen folgende Nachteile gegenüber:

- Zeitliche Abhängigkeit vom Bauprogramm des jeweiligen Bauherrn
- Einengung bei der Berücksichtigung der verschiedenen Gesteinstypen
- Keine Einflussmöglichkeit auf die verwendeten Abbaugeräte
- Grosse Variabilität der Randbedingungen zwischen den einzelnen Versuchsstellen.

Der erste Kredit gestattete die Durchführung eines Pilot-Programmes, d.h. einer beschränkten Anzahl von Studien an verschiedenen Felsarten. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass der eingeschlagene Weg erfolgversprechend sei.

Die Resultate wurden in einem 1. Zwischenbericht (Stand Ende 1972) vom 10.2.1973 veröffentlicht. Gleichzeitig wurde ein Gesuch um einen Fortsetzungskredit von Fr. 107'000.-- gestellt, das am 30.7.1973 zum

Forschungsauftrag 22/73 (Kredit Fr. 60'000.--)

führte.

Ziel dieser Phase war die Durchführung von ergänzenden Studien zur Gewinnung einer für statistische Auswertung minimal erforderlichen Anzahl von Messwerten resp. Praxiserfahrungen sowie der Abschluss der Forschung bis 1975. Ferner sollten Parallelversuche mit der ISETH-Felssonde und dem ASF-Ramm-Meissel durchgeführt werden.

Leider wurde der Ablauf der Forschungsarbeiten in der Folge durch eine Reihe von unvorhergesehenen äusseren Einflüssen stark beeinträchtigt. Zunächst waren es die Konjunktur-Dämpfungsmassnahmen des Bundes (Ausgabenkürzung), welche unsere jährliche Kreditlimite auf Fr. 24'000.-- begrenzten. Dann setzte die Rezession ein. Bei zahlreichen Objekten, für die unsere geologisch-geophysikalischen Vorarbeiten ausgeführt worden waren, verzögerte sich die Realisierung, so dass die praktischen Bauerfahrungen während längerer Zeit nicht mehr ermittelt werden konnten.

Am 6.1.1977 konnten wir einen 2. Zwischenbericht (Stand Ende 1976) vorlegen, dessen Inhalt die VSS bewog, das von uns gestellte Gesuch um einen Fortsetzungskredit zu unterstützen. Das EDI bewilligte am 18.8.1977 dieses Gesuch und erteilte damit den

Forschungsauftrag 26/77 (Kredit Fr. 67'000.--)

Damit wurde es möglich, den Rest unseres bereits 1973 beantragten, jedoch damals nur zur Hälfte bewilligten Untersuchungsprogrammes durchzuführen.

Noch heute sind nicht auf allen untersuchten Baustellen die Abbau-Arbeiten durchgeführt worden. Wir schliessen unsere Arbeiten trotzdem per Ende 1981 ab, damit die bisherigen Ergebnisse der Praxis zur Verfügung gestellt werden können.

1.2 Zielsetzung

Das Kreditgesuch von 1969 formulierte das Forschungsziel wie folgt:

- Definition von objektiven Kriterien für die Abgrenzung der Bodenklassen bezüglich Abbaubarkeit, welche vom gegenwärtigen Stand der Maschinentechnik unabhängig sind.

Innerhalb dieser umfassenden Zielsetzung konzentrierten sich unsere Forschungen speziell auf die Abgrenzungen

schwer baggerbare Böden/ripperbare Böden
sowie

ripperbare Böden/Sprengfels

Die Forschungsergebnisse sollten den Entwurf von Richtlinien für die einheitliche Ermittlung und Interpretation von Kriterien für die Vor-
ausbestimmung der Abbaubarkeit ermöglichen.

Diese Zielsetzung blieb auch für die Fortsetzungskredite gültig.

2. BISHERIGE ANSAETZE ZUR CHARAKTERISIERUNG VON FELSGESTEINEN IM HINBLICK AUF DEREN ABBAUBARKEIT

Die ersten Vorschläge für Reissbarkeitsprognosen basierten auf dem Zusammenhang zwischen der Felsqualität und der Geschwindigkeit von P-Wellen. CHURCH (1965) publizierte Diagramme, in welchen ein direkter Zusammenhang zwischen seismischer Geschwindigkeit und Abbaukosten postuliert wurde (Figur 1).

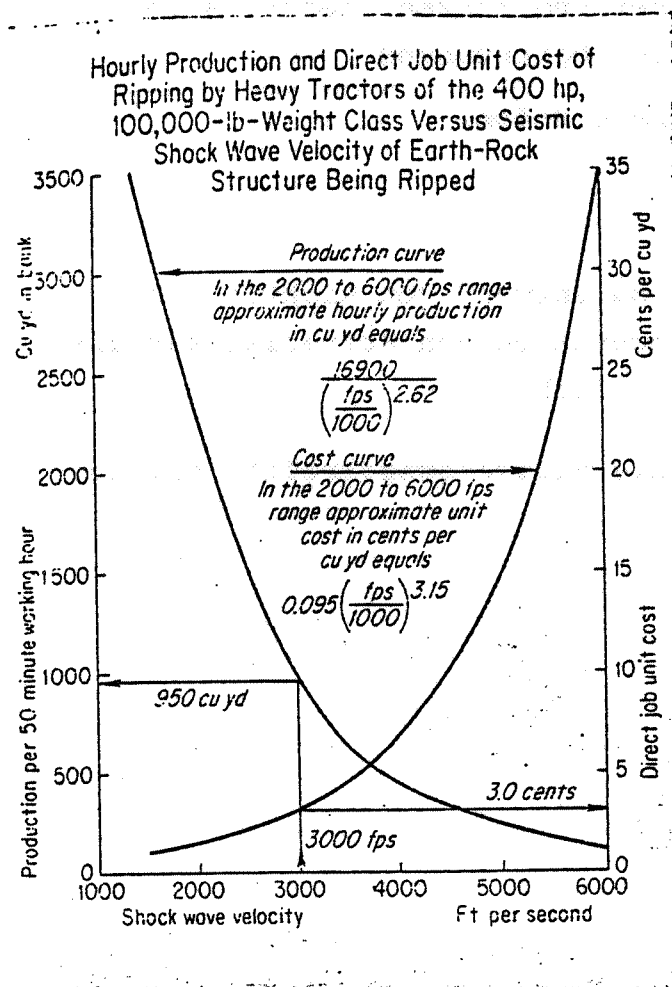


Chart A: Production and costs vs. velocity.

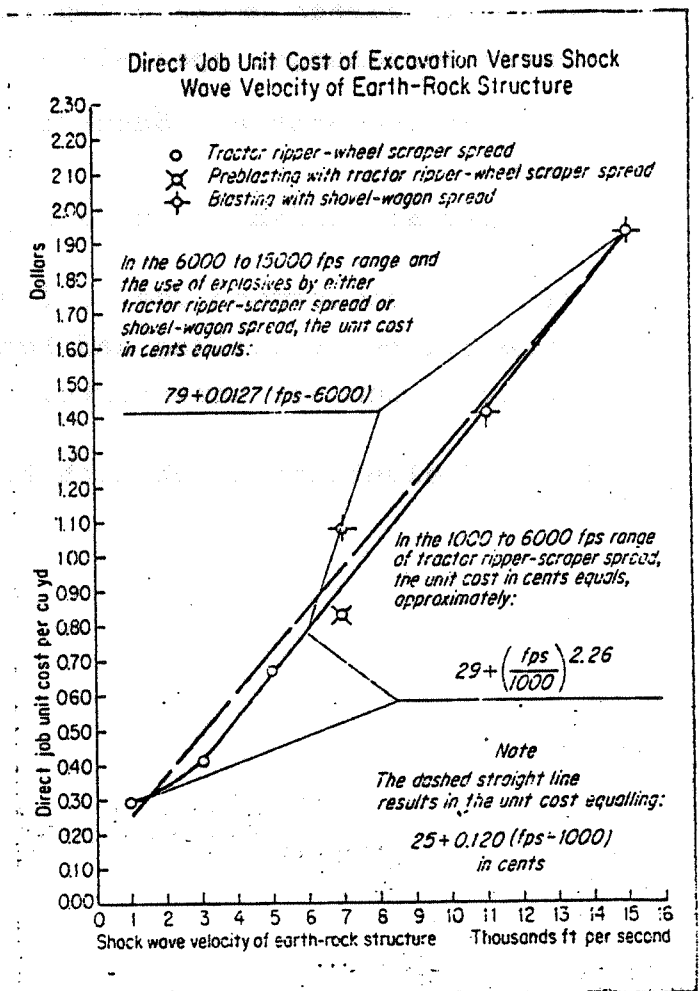
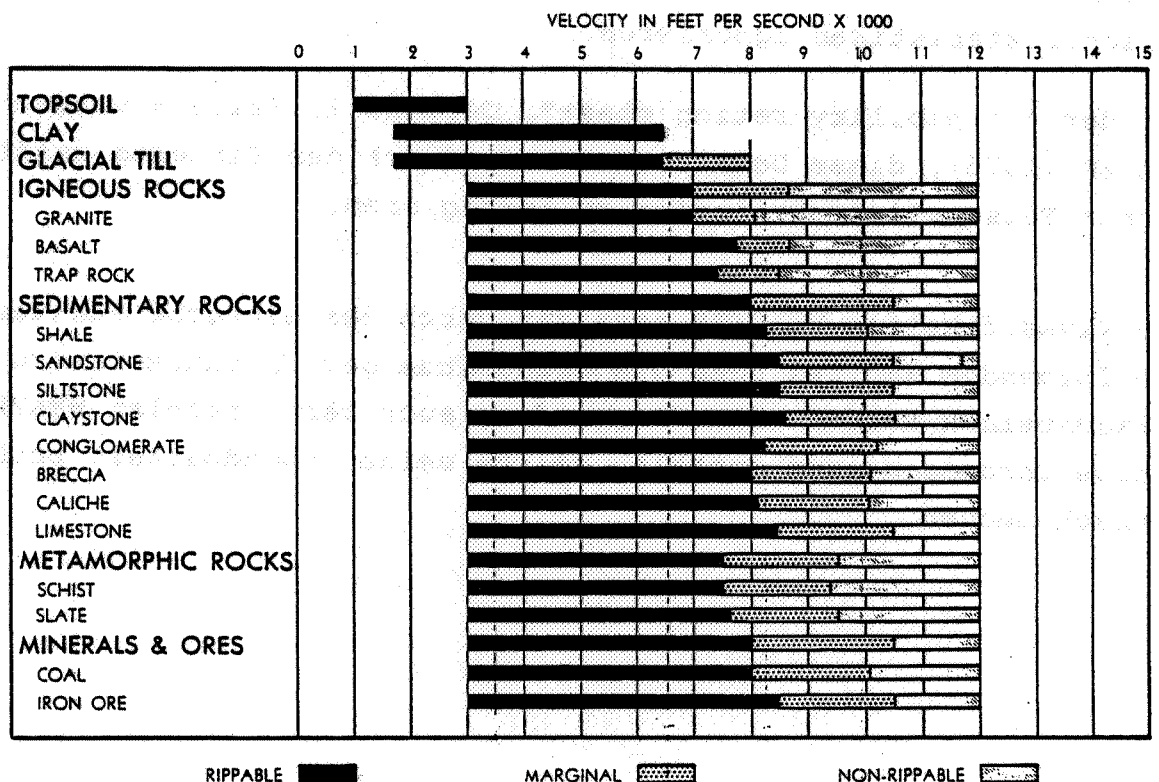


Chart B: Direct job unit costs vs. velocity.

Figur 1 : Korrelation von seismischer Geschwindigkeit und Abbauleistung resp. Abbaukosten, nach CHURCH (1965)

Ein Jahr später erschien das "Handbook of Ripping" von CATERPILLAR (1966). Hier wurde die Reissbarkeit ebenfalls mit der seismischen Geschwindigkeit korreliert, jedoch nun schon differenziert unter Berücksichtigung von Gesteinsart und eingesetztem Maschinentyp (Figur 2)



Figur 2 : Reissbarkeit verschiedener Gesteinsarten in Abhängigkeit von der seismischen Geschwindigkeit, nach CATERPILLAR (1966)

Die Caterpillar-Tabellen fanden weltweite Beachtung: man glaubte ein einfaches Verfahren gefunden zu haben, welches erlauben würde, die Reissbarkeit von Fels billig und schnell vorausbestimmen zu können.

Die Methode wurde auf vielen Baustellen angewendet, in verschiedenen Publikationen kommentiert (GUTHEIL, 1970; DARCY, 1971; KIEKENAP, 1972; CHURCH, 1972 u.a.).

Die praktischen Erfahrungen zeigten jedoch sehr bald, dass der Zusammenhang zwischen Beschaffenheit und Reissbarkeit eines Felses nicht so einfach zu definieren ist und dass er vor allem nicht allein mit einer seismischen Geschwindigkeit charakterisiert werden kann. Die Caterpillar-Tabellen sind nicht nur deshalb nicht allgemein verwendbar, weil sie auf amerikanische Verhältnisse zugeschnitten sind, sondern vielmehr weil sie wichtige geologische Felscharakteristiken ignorieren.

Mit der "Rippability rating chart", Tabelle 1, Seite 8 versuchte WEAVER (1975), diese Unzulänglichkeit durch den Einbezug zusätzlicher Felsqualitätskriterien zu korrigieren.

Die Klassifikation WEAVERS besteht durch das einfache Punktesystem. Die folgenden Kapitel über die Grundsätze der Charakterisierung von Felsgesteinen zeigen allerdings, dass auch der Vorschlag WEAVERS einige Inkonsistenzen enthält, welche seine Anwendbarkeit problematisch machen.

Rippability rating chart

<i>Rock class</i>	I	II	III	IV	V
<i>Description</i>	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock
<i>Seismic velocity (m/s)</i>	> 2 150	2 150 - 1 850	1 850 - 1 500	1 500 - 1 200	1 200 - 450
<i>Rating</i>	26	24	20	12	5
<i>Rock hardness</i>	Extremely hard rock	Very hard rock	Hard rock	Soft rock	Very soft rock
<i>Rating</i>	10	5	2	1	0
<i>Rock weathering</i>	Unweathered	Slightly weathered	Weathered	Highly weathered	Completely weathered
<i>Rating</i>	9	7	5	3	1
<i>Joint spacing (mm)</i>	> 3 000	3 000 - 1 000	1 000 - 300	300 - 50	< 50
<i>Rating</i>	30	25	20	10	5
<i>Joint continuity</i>	Non continuous	Slightly continuous	Continuous - no gouge	Continuous - some gouge	Continuous - with gouge
<i>Rating</i>	5	5	3	0	0
<i>Joint gouge</i>	No separation	Slight separation	Separation < 1 mm	Gouge - < 5 mm	Gouge - > 5 mm
<i>Rating</i>	5	5	4	3	1
<i>*Strike and dip orientation</i>	Very unfavourable	Unfavourable	Slightly unfavourable	Favourable	Very favourable
<i>Rating</i>	15	13	10	5	3
<i>Total rating</i>	100 - 90	90 - 70**	70 - 50	50 - 25	< 25
<i>Rippability assessment</i>	Blasting	Extremely hard ripping and blasting	Very hard ripping	Hard ripping	Easy ripping
<i>Tractor selection</i>	-	DD9G/D9G	D9/D8	D8/D7	D7
<i>Horsepower</i>	-	770/385	385/270	270/180	180
<i>Kilowatts</i>	-	575/290	290/200	200/135	135

* Original strike and dip orientation now revised for rippability assessment.

** Ratings in excess of 75 should be regarded as unrippable without pre-blasting.

Tabelle 1: "Rippability rating chart" nach
WEAVER (1975).

3. GRUNDLAGEN DER CHARAKTERISIERUNG VON FELS

3.1 Allgemeines zur Beschreibung von Fels

3.1.1 Die Begriffe "Gestein" und "Gebirge"

Werden Felseigenschaften beschrieben, so ist es wichtig, den Gröszenbereich festzulegen, für den sie gelten.

Als Kleinbereich "Gestein" wird derjenige Bereich definiert, welcher im Labor untersucht werden kann. Es handelt sich dabei in der Regel um Felsproben von Handstückgrösse, Bohrproben u.ä.. Der Grossbereich "Gebirge" muss am Naturvorkommen selbst studiert und beschrieben werden. Das Gebirge stellt dabei ein Mehrstoffsystem dar, welches aus einer bis mehreren Gesteinsarten, sowie Wasser und Luft besteht. Seine Verhaltensweise ist von den Eigenschaften der einzelnen Stoffe wie auch von ihrem Zusammenwirken abhängig.

Tabelle 2: Wichtigste Gesteins- resp. Gebirgseigenschaften im Hinblick auf die Abbaubarkeit von Fels

Gesteinseigenschaften	Gebirgseigenschaften
Gesteinshärte Gesteinsfestigkeit Bruchverhalten	Gefügeverhältnisse (Schichtung, Klüftung, Schieferung) - Kluftdichte - Durchtrennungsgrad - Kluftabstand - Grösse der Kluftkörper - räumliche Lage der Klüfte
Anisotropie und Inhomogenität des Gesteins	Anisotropie und Inhomogenität des Gebirges

Es ist daher offensichtlich, dass Gebirge und Gestein sehr verschiedene Eigenschaften aufweisen können.

Für die Beurteilung von Fels bezüglich Abbaubarkeit sind Gebirgsbereiche zu betrachten, deren Abmessung zumindest dem Wirkungsbereich des Gerätes entsprechen. Also werden wir uns mit den Eigenschaften von Gebirgskörpern (Seite 10) zu befassen haben und unsere Untersuchungen entsprechend auslegen müssen. Die Eigenschaften des Kleinbereichs (Handstück, Bohrkern) können unter Umständen für die Reissbarkeit vollständig unerheblich sein.

3.12 Anisotropie und Inhomogenität des Gebirges

Isotrop ist ein Körper, der in allen Richtungen gleiche physikalische Eigenschaften aufweist. Vollständig isotrope Gebirgskörper finden sich in der Natur kaum.

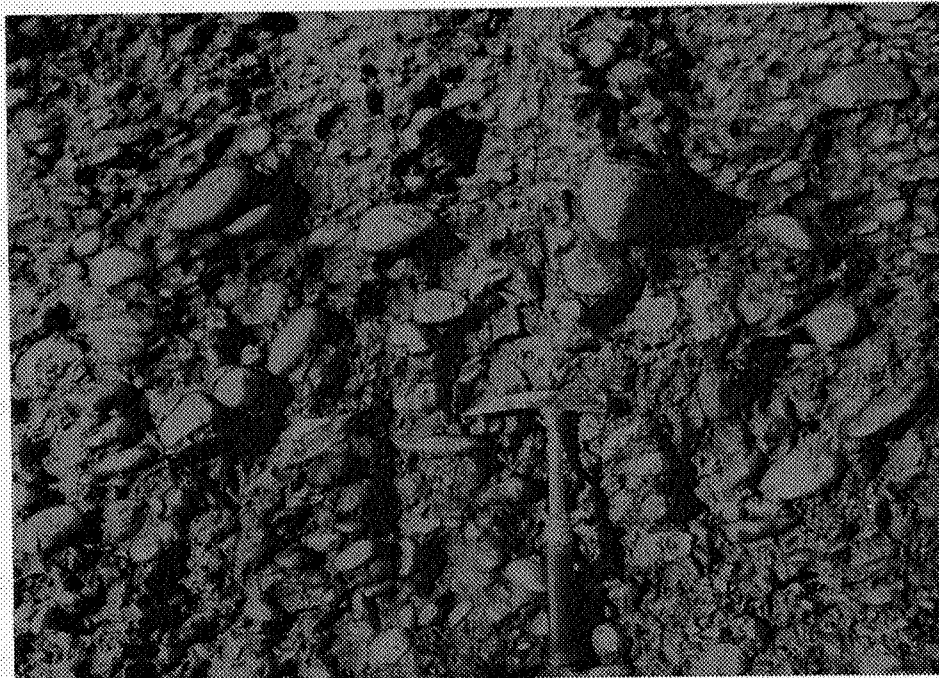
In der Praxis gibt es jedoch Fälle, bei denen von statistischer Isotropie oder "Quasi-Isotropie" gesprochen werden kann (Figur 3, Seite 11).

Als anisotrop sind Gebirge zu betrachten, die infolge ihrer Schichtung, Schieferung oder Klüftung (Gefüge) eine oder mehrere ausgeprägte Spaltbarkeiten oder Durchtrennungen in bestimmten Richtungen aufweisen (Gefüge-Anisotropie, Figur 4, Seite 12).

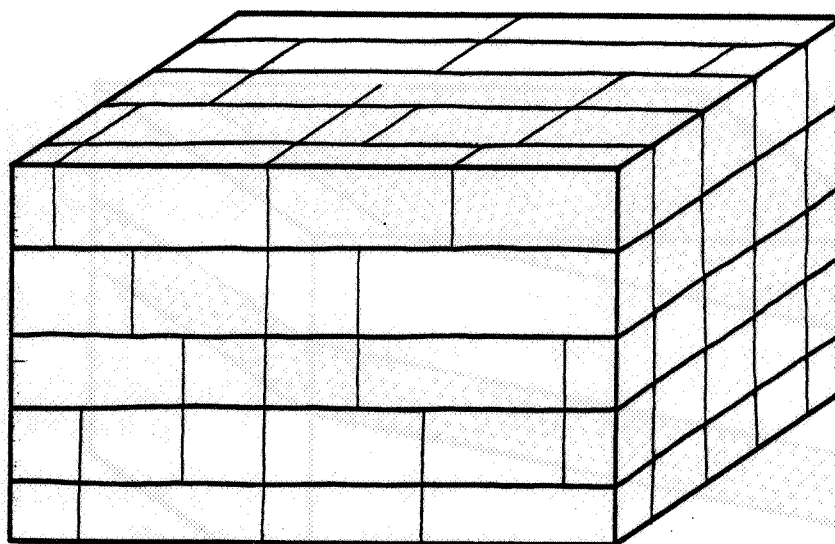
Inhomogenität (Figur 5, Seite 13) kann bedingt sein durch

- Wechsellagerung verschiedener Gesteine, z.B. Mergel-Sandstein-Abfolgen, Einlagerungen von Blöcken etc.
- Unterschiedliche Art der Verwitterung oder Zerklüftung

Inhomogenität hat fast immer auch Anisotropie zur Folge. Dagegen kann ein homogenes Gebirge durchaus sehr anisotrop sein.

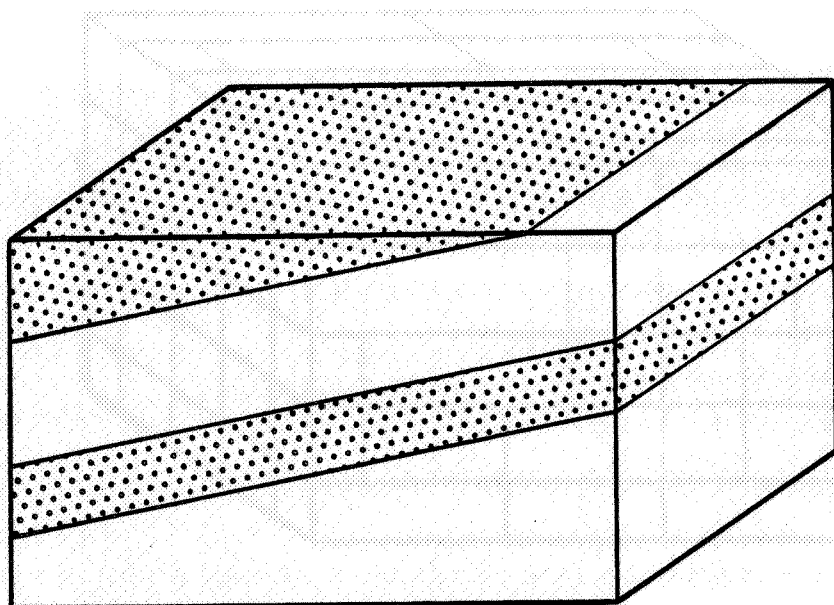


Figur 3: Quasi-isotropes Gebirge
 Oben : Beispiel Moräne
 Unten : Beispiel Nagelfluh



Figur 4: Anisotropes Gebirge

Unten : Beispiel zerklüfteter Kalk, Baustelle No 28/A36



Figur 5: Inhomogener Gebirgsaufbau durch Wechsellagerung verschiedener Gesteine

Unten : Wechsellagerung von Sandstein und Mergel in der Molasse

Beispiele für quasi-isotrope Gebirge:

- Moräne
- Nagelfluh
- massige, nicht zerklüftete Sandsteine
- massige, nicht zerklüftete Granite

Beispiele für anisotrope Gebirge:

- geschichtete und zerklüftete Molasse-Sandsteine und -Mergel
- Sedimentgesteine des Juras und der Alpen
- Kristallingesteine der Alpen (Schiefer, Gneise, geklüftete Granite)

3.2 Materialeigenschaften

3.21 Gesteinseigenschaften

- Die Gesteinshärte

Als Härte eines Gesteins wird im wesentlichen dessen Widerstand gegenüber dem Eindringen eines Körpers verstanden. Sie kann mit verschiedenen Methoden untersucht und charakterisiert werden (z.B. Ritzhärte, Bohrbarkeit, Rückprallhärte).

Oft wird die Gesteinshärte mit der Gesteinsfestigkeit verwechselt. WEAVER (1975) versteht z.B. unter seiner "rock hardness" die einachsige Druckfestigkeit (Tabelle 1, Seite 8).

DE QUERVAIN (1967) dagegen versteht unter Gesteinshärte die Kombination von Druckfestigkeit als Ausdruck der allgemeinen Verbandsfestigkeit und dem Gehalt an harten Mineralien (härter als Stahl, d.h. 5 1/2 in der Härteskala von Mohs).

- Die Gesteinsfestigkeit

Die Festigkeitseigenschaften eines Gesteins werden im Wesentlichen durch folgende Faktoren bestimmt:

- Festigkeit des gegenseitigen Verbandes der Mineralkörner (Kornbindung)
- innere Festigkeit der Einzelkörner
- Korngrösse
- Einregelung der Mineralien (Gesteinsgefüge)
- vorhandene Inhomogenitäten, wie Hohlräume, Poren
- Wassersättigung des Gesteins.

- Das Bruchverhalten

Je nach dem Deformationsverhalten unterscheidet man einen Sprödbbruch oder einen plastischen Bruch.

In der Geologie werden für die Charakterisierung des Verhaltens gegenüber Verformung die Ausdrücke kompetent (rigid) und inkompetent verwendet.

Inkompetent nennt man Gesteine, die einer Verformung unter gleichen Spannungsverhältnissen geringeren Widerstand entgegen setzen als die kompetenten oder rigiden Gesteine. Die inkompetenten Gesteine vermögen aufgrund ihrer grösseren Plastizität verformenden Kräften auszuweichen.

3.22 Gebirgseigenschaften

Die Gebirgseigenschaften werden vor allem durch das Gesteinsgefüge geprägt. Dieses wird charakterisiert durch die Gefügeflächen und den Auflockerungsgrad.

3.221 Gefügeflächen

Das Gefüge tritt in Form von Trennflächen auf. Diese Trennflächen können geschlossen, latent, oder offen als Fugen vorhanden sein.

Gefügeflächen kommen als

- Schichtflächen
- Schieferungsflächen
- Kluftflächen

vor.

In der Ingenieurgeologie werden diese genetisch klar differenzierbaren Gefügeflächen meist nicht scharf unterschieden und offene Diskontinuitätsflächen schlechthin als "Klüfte" bezeichnet.

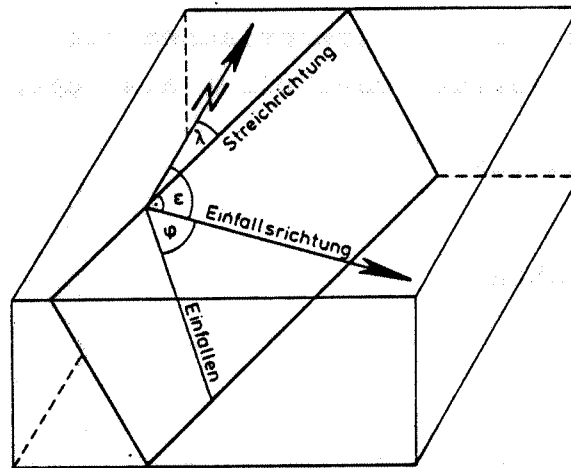
Ein Erkennen der Schichtung oder Schieferung ist jedoch deshalb von Bedeutung, weil diese Diskontinuitäten oft die ausgeprägtesten Gefügeflächen sind und sich durch einen grossen Durchtrennungsgrad auszeichnen (siehe unten). Zudem findet sich fast immer ein mehr oder weniger senkrecht zur Schichtung oder Schieferung stehendes Kluftsystem.

Die Oeffnungsweite der Trennflächen kann vom sehr kleinen Haarriss bis zur grösseren Klaffung von Zentimetern bis Dezimetern variieren.

Je nach Anzahl und Oeffnungsweite der Klüfte ergibt sich für das Gebirge ein mehr oder weniger grosses Kluftvolumen.

Klüfte oder Schichtfugen können mit fremdartigem Material (Kluftmineralisationen, Verwitterungsprodukte) gefüllt sein.

Die räumliche Lage von Gefügeflächen wird in der Geologie durch Streichen und Fallen definiert (Fig. 6). Das Einmessen erfolgt mit Hilfe des Geologenkompasses.



Figur 6: Räumliche Festlegung flächiger Elemente

Unter Durchtrennungsgrad wird die Häufigkeit des Durchsetzens einer Kluft bis zum Auftreffen auf eine andere Kluft verstanden (Müller, 1963). Die Durchtrennungsgrade verschiedener Kluftsysteme im Gebirge beeinflussen im wesentlichen die zu erwartende Ausbruchsform, die anfallende Kluftkörpergrösse, sowie die Beweglichkeit der einzelnen Kluftkörper.

Mit Klüftigkeit oder Kluftdichte wird die Häufigkeit der Klüfte längs einer Messstrecke bezeichnet.

Aus den Kluftdichten verschiedener z.B. senkrecht zueinander stehender Kluftsysteme kann die Grösse und die Form des Kluftkörpers bestimmt werden.

In der Ingenieurgeologie wird der Zerklüftungsgrad eines Gebirges oft mit dem RQD (rock quality designation) charakterisiert.

Der RQD ist nach DEERE (1968) wie folgt definiert:

$$\text{RQD} = 100 \frac{\text{Summe der Bohrkernstücke} > 10 \text{ cm}}{\text{berücksichtigte Kernlänge (1 m)}}$$

Der RQD erfasst folglich nur Kluftabstände der Grösse $< 10 \text{ cm}$ (4 inches). Felsabschnitte mit vielen offenen Klüften können also durchaus einen RQD von 100 % haben, nämlich dann, wenn die Kluftabstände $> 10 \text{ cm}$ sind.

3.222 Auflockerungsgrad

Der Auflockerungsgrad eines anisotropen Gesteins ist vornehmlich durch die Kluftöffnung oder das Kluftvolumen bestimmt. Diese können linear oder räumlich betrachtet werden und entsprechen dem anteilmässigen Hohlraum der Klüfte im Gesteinskörper (MUELLER, 1963). Wichtig ist dabei die Feststellung, dass ein hoher Auflockerungsgrad, d.h. ein grosses Kluftvolumen, nicht unbedingt einer grossen Kluftdichte entspricht.

Auf die Bestimmung des Auflockerungsgrades mit Hilfe der Seismik wird in Abschnitt 5.1 näher eingegangen.

4. EIGNUNG UND WAHL VON FELSKRITERIEN FÜR REISSBARKEITS- PROGNOSEN

4.1 Anforderungen an die Kriterien

Neben ihrer grundsätzlichen Anwendbarkeit und Aussagekraft müssen die Kriterien folgende Anforderungen erfüllen:

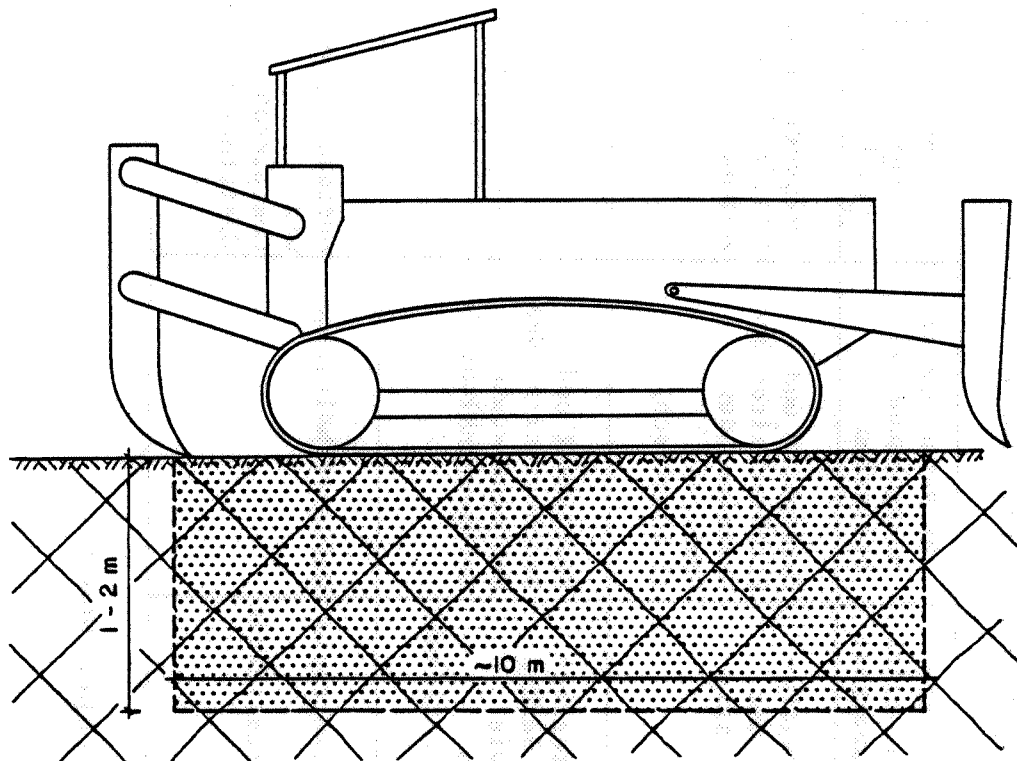
- sie sollen eine möglichst allgemeine Gültigkeit haben und für verschiedene Gesteinstypen anwendbar sein
- sie sollen auf eine einfache Art und mit wirtschaftlichem Aufwand ermittelt werden können
- sie sollen möglichst unabhängig vom eingesetzten Maschinentyp sein

4.2 Aussagekraft und Anwendbarkeit von Felskriterien für Reissbarkeitsprognosen

Die Grösse des Gebirgsbereiches, für den die Kriterien Gültigkeit haben sollen, ergibt sich aus der Grösse des durch einen Ripper erfassbaren Felskörpers (Figur 7, Seite 20). Diese liegt in der Grössenordnung von einigen Kubikmetern.

Eigenschaften, welche grössere Gebirgsbereiche charakterisieren, sind somit für die Reissbarkeit an sich nicht bestimmend, sondern höchstens für deren Variation, z.B. infolge inhomogenem Gebirgsaufbau. Andererseits sind auch Eigenschaften, welche kleinere Bereiche, z.B. den Gesteinsbereich, beschreiben, grundsätzlich ebenfalls nicht massgebend.

Nun gibt es jedoch Gebirgstypen, in denen die Gesteins- und Gebirgseigenschaften nahezu identisch sind. Dies gilt angenähert für die isotropen Gebirge wie Moräne, Nagelfluh, massige Sandsteine und andere. In diesen Fällen können bestimmte Gesteinseigenschaften als Kriterien für die Abbaubarkeit herangezogen werden.



Figur 7: Wirkungsbereich eines Rippers

Es drängt sich folglich eine Unterteilung in isotrope und anisotrope Gesteine auf, für welche unterschiedliche Felskriterien anzuwenden sind. Eine Ignorierung dieser Tatsache - wie bei früheren Reissbarkeits-Klassifikationen - führt zwangsläufig zu einer Beeinträchtigung der praktischen Anwendbarkeit. Zum Beispiel ist die Gesteinshärte eines Probekörpers aus einem anisotropen Gebirgsverband kaum von entscheidender Bedeutung für dessen Reissbarkeit, da sie von Anisotropie-Effekten überlagert wird. Auf der andern Seite treten die Gefügeverhältnisse, welche die anisotropen Gebirge dominieren, bei den isotropen Gebirgen vollständig in den Hintergrund.

Tabelle 3, Seite 21 illustriert die Anwendbarkeit von Felskriterien für Reissbarkeitsprognosen bei verschiedenen Gebirgstypen.

Gebirgstyp	Felsarten	Bruchverhalten	Gesteinseigenschaften/Gebirgseigenschaften	Verbandsfestigkeit im Hinblick auf Reissbarkeit	für Reissbarkeit massgebende Felskriterien	für Reissbarkeit nicht massgebende Felskriterien
Quasi-isotrope Weichgesteine	- Moräne - Nagelfluh	unregelmässig diffus	Gesteinseigenschaften entsprechen den Gebirgseigenschaften	Gesteinsfestigkeit bestimmt Verbandsfestigkeit	Festigkeit und Bruchverhalten des Gesteins oder Gebirges ($\pm$ identisch)	Gefügeverhältnisse, da kein Gefüge vorhanden
Anisotrope Weichgesteine	Mittelländische Molassesandsteine und Mergel	vorgezeichnet entlang von Trennflächen und unregelmässig	Ausgeprägter Unterschied zwischen Gebirgs- und Gesteinseigenschaften	Gesteinsfestigkeit und Gefügeanisotropie bestimmen Verbandsfestigkeit	Festigkeit und Bruchverhalten des Gesteins sowie Gefügeverhältnisse	
Isotrop - anisotrope, rigide, harte Gesteine	Sediment- und Kristalline Gesteine des Jura und der Alpen	vorgezeichnet, nur entlang von Gefügeflächen		Gefügeanisotropie bestimmt Verbandsfestigkeit	Gefügeverhältnisse	Gesteinseigenschaften wie Gesteins Härte Gesteinsfestigkeit

Tabelle 3: Anwendbarkeit von Felskriterien für Reissbarkeitsprognosen isotroper und anisotroper Gebirgstypen

Die Zusammenstellung zeigt eine Unterteilung in drei Gebirgstypen. Eine erste Einstufung ergibt sich durch die Verbandsfestigkeit des Gesteins. Bei den "Weichgesteinen" mit Druckfestigkeiten $< 400 \text{ kp/cm}^2$ bestimmen die Gesteinseigenschaften des Kleinbereiches die Abbaubarkeit. Bei den harten, rigiden Gesteinen sind dagegen allein die Gefügeverhältnisse (Gefüge - Anisotropie) für die Abbaubarkeit massgebend. Isotrope, d.h. kluftfreie und zugleich rigide und harte Felsarten werden nicht reissbar sein.

Die anisotropen Weichgesteine der Molasse des schweizerischen Mittellandes nehmen dabei eine Sonderstellung ein. Die Abbaubarkeit dieser Felsart wird einerseits durch die Gefügeanisotropie bestimmt, zugleich aber in hohem Masse von den Gesteinseigenschaften. Diese letzteren können je nach Festigkeit (primär bedingt durch den Grad der Zementierung, sekundär durch Lösung der Zementierung infolge Verwitterung) bei der Abbaubarkeit den dominierenden Faktor bilden, so dass die Gefügeanisotropie an Bedeutung verliert. Dieser Gebirgstyp liegt bezüglich seiner Abbaueigenschaften also zwischen den quasi-isotropen und anisotropen Gesteinen und tendiert je nach Gesteinsfestigkeit auf die eine oder andere Seite.

5. METHODIK ZUR ERMITTLUNG DER FELSKRITERIEN IM HINBLICK AUF REISSBARKEITSPROGNOSEN

5.1 Die seismische Ermittlung der Verbandsfestigkeit (Interpretation von P-Wellen-Geschwindigkeiten)

5.11 Seismische Verfahren

5.111 Generelle Bemerkungen

Zur Erreichung des Hauptziels, der raschen Beurteilung der Reissbarkeit von Gesteinsschichten aufgrund der Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen, waren von Anfang an folgende Bedingungen an die Messmethodik und die entsprechenden Verfahren zu stellen:

- Einfachheit hinsichtlich
 - Messmethode
 - Geräte (Messtechnik)
 - Auswertung
- Rasche Ausführung, d.h. geringer personeller und zeitlicher Aufwand
- geringe Kosten

Aus diesen Gründen ging und geht es nicht darum, methodische und apparative Raffinessen zu entwickeln. Diese hätten eine extreme Spezialisierung nach sich gezogen und damit das Verfahren für den praktischen Einsatz bei der Reissbarkeitsprognose von vornherein in Frage gestellt.

Da zudem stets oberflächennahe Bereiche zu untersuchen sind, bot sich die refraktionsseismische Methode an und zwar in ihrer einfachsten Form, der sog. Ersteinsatz-Seismik. Dabei werden in den Seismogrammen lediglich die Einsätze der zuerst eintreffenden Wellenfronten berücksichtigt.

Dadurch ist auch der zu untersuchende Wellentyp bestimmt: Die Erstein-satz-Seismik basiert auf den Kompressions- oder Longitudinalwellen,* da diese gegenüber den Scher- oder Transversalwellen** sowie den Oberflächenwellen höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten aufweisen. Da es sich bei den Kompressionswellen um Raumwellen handelt, sind anstelle von refraktionsseismischen Messungen an der Erdoberfläche auch Durchschallungen zwischen Tunneln, Bohrungen oder Stollen möglich. Dabei kann stets der gleiche Wellentyp untersucht werden; die gewonnenen Resultate sind also vergleichbar. Dasselbe gilt für Aufzeit- oder Abzeitschiessen in Bohrungen (wellshooting).

5.112 Refraktionsseismik als Hauptmethode

Das Prinzip der Refraktionsseismik ist in allen klassischen und neuen Lehrbüchern der angewandten Geophysik sowie in Spezialauf-sätzen ausführlich behandelt [z.B. HAALK (1958) GASSMANN-WEBER (1960) MUSGRAVE et al. (1967) etc., HAGEDOORN (1959), PALMER (1980)] . Aus diesem Grunde verzichten wir an dieser Stelle auf Details.

Hauptziel der Refraktionsseismik im Rahmen der Ripperbarkeits-Prognose ist die zuverlässige Bestimmung von Schichtgeschwindig-keiten, vor allem natürlich für die von der Prognose zu erfassen-den Schichtkomplexe. Dies setzt voraus, dass sämtliche untersuch-ten Profile gegengeschossen werden. Nach Möglichkeit sind beid-seits sog. Weitschüsse anzuordnen mit dem Ziel, refraktierte Einsätze längs der gesamten Profillänge zu gewinnen. Dies ist unbedingt notwendig, wenn die elegante und praktische Auswert-methode nach HAGEDOORN (1959) benützt werden soll. Mehrere Schüs-se innerhalb desselben Profiles geben die unerlässliche Auskunft über allfällige laterale Geschwindigkeitsvariationen in den über dem Fels liegenden Schichten. Zudem sind diese Zwischenschüsse un-bedingt notwendig, wenn ein allfälliger vertikaler Gradient im Refraktor festgestellt werden soll.

* P-Wellen

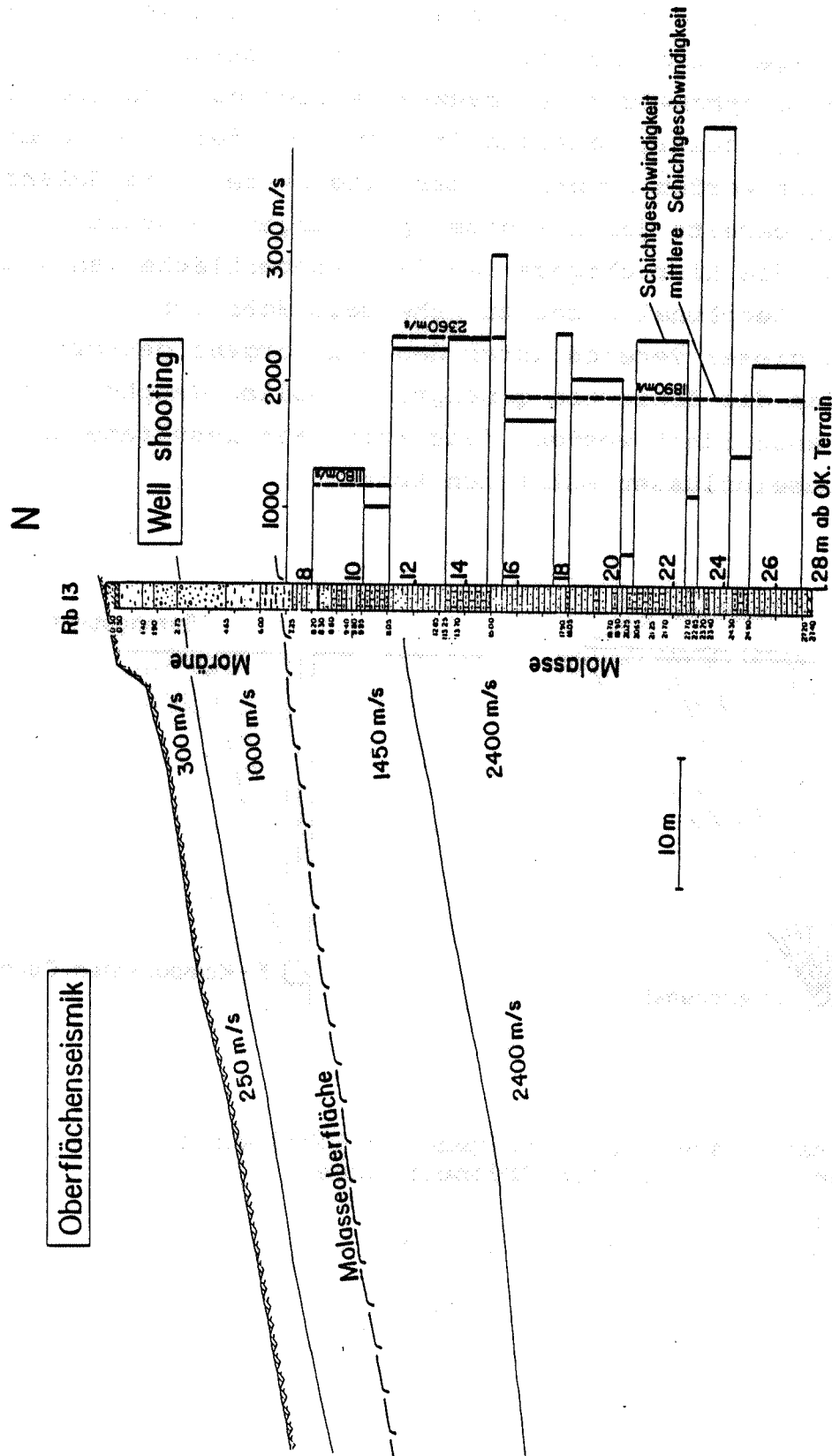
** S-Wellen

Im Grenzbereich Ripperfels - Sprengfels, z.B. in der Süßwasser-Molasse, werden oft Geschwindigkeiten von etwas mehr als 2500 m/s angetroffen. Wer sich aber nicht auf Anfangs- und Endschüsse beschränkt, wird mit etwas mehr Aufwand an Zwischenschüssen feststellen, dass - zumindest abschnittsweise - eine Übergangszone mit zunehmender Geschwindigkeit von ca. 1900 - 2500 m/s vorhanden ist. Dieser Übergangsbereich kann meist von den Rippergeräten noch bewältigt werden. Lediglich bei Geschwindigkeiten über 2800 m/s, wie sie innerhalb der Molasse vielfach erst in einigen Metern Tiefe auftreten, wäre mit Sicherheit Sprengfels anzunehmen.

Beim Einsatz von Geräten für Hammerschlag-Seismik ist darauf zu achten, dass für die Geschwindigkeitsbestimmung im Refraktor eine ausreichende Profillänge mit genügend guten Einsätzen zur Verfügung steht. Ohne elektronische Stapelung besteht die Gefahr, dass für die Geschwindigkeitsbestimmung zu wenig Punkte zur Verfügung stehen. Auch hier sollte auf Weitschläge nicht verzichtet werden. In vielen Fällen muss mit Weitschüssen (Sprengungen) ein ausreichendes Nutz-Störsignal-Verhältnis sichergestellt werden.

Dort, wo der Verdacht auf laterale Inhomogenität und/oder Anisotropie im Fels besteht (oder dieser Verdacht nicht apriori ausgeschlossen werden kann), sind seismische Profile kreuzweise anzuordnen. Besteht z.B. eine ausgeprägte bevorzugte Klufttrichtung, so werden die Geschwindigkeiten parallel zur Klufttrichtung deutlich höher sein als senkrecht dazu (Seite 30/31).

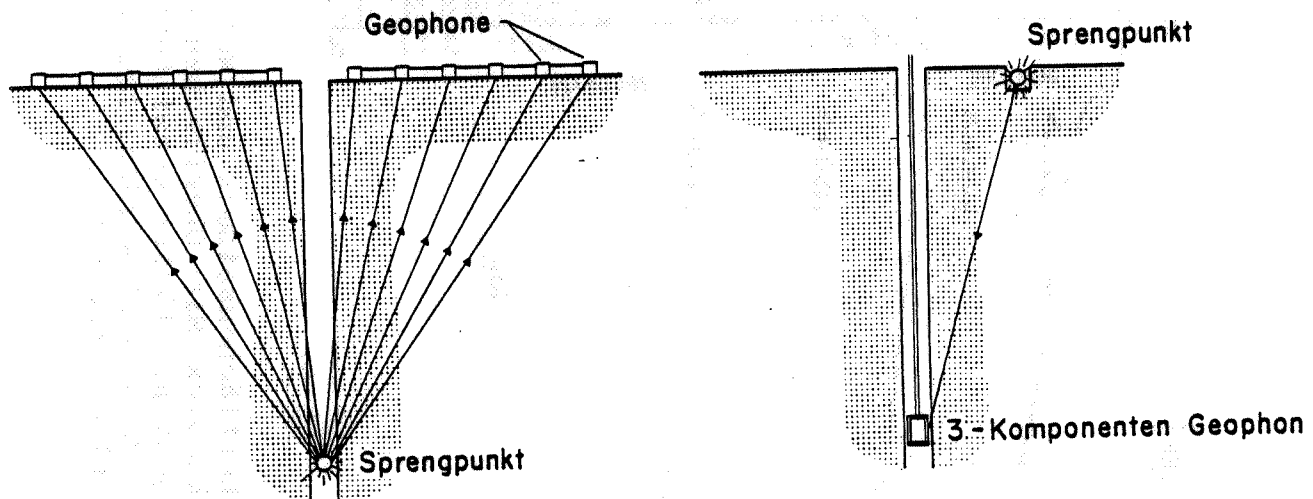
Gross ist die Gefahr von Fehlinterpretationen im Falle von Gesteins-Wechselagerungen. Eine Hauptvoraussetzung für die refraktions-seismische Methode ist die Zunahme der Geschwindigkeit mit der Tiefe. Bei Wechselagerungen können aber unter härteren Schichten, die gesprengt werden müssen, wieder weichere, ohne weiteres als ripperbar geltende Pakete, folgen. In solchen Fällen müssen Methoden herangezogen werden, die es erlauben die Geschwindigkeiten paketweise zu ermitteln : z.B. Auf- oder Abzeitschiessen (well-shooting).



Figur 8: Ergebnisse von Oberflächenseismik und Well-shooting in einem inhomogenen Molasse-Gesteinskomplex. Mit Oberflächenseismik konnte die unter der Schicht mit 2400 m/s liegenden, stärker verwitterten Gesteine (mittlere Geschwindigkeit 1890 m/s) nicht erfasst werden. Das Well-shooting lässt den inhomogenen Gebirgsaufbau deutlich erkennen.

5.113 Bohrlochmethoden (well-shooting)

Wie erwähnt, sind Schüsse aus Bohrlöchern auf Geophonauslagen bei Gesteins-Wechselagerungen unerlässlich. Beim Aufzeitschiessen besteht die Chance, Geophon-Profile kreuzweise über das Bohrloch zu legen, so dass gleichzeitig laterale Anisotropie- oder Inhomogenitätseffekte erfasst werden können. Andererseits besteht die Gefahr, dass das Bohrloch bereits durch wenige Sprengungen zerstört wird. Wichtig ist, dass die Einrichtungen an der Erdoberfläche (entweder Schusspunkte oder Geophone) nicht zu nahe beim Bohrlochmund platziert werden, da dieser Bereich durch den Bohrvorgang gestört worden ist. Verlaufen die Schichten geneigt, so sollen Geophone und Schusspunkte so angeordnet werden, dass keine Fehlresultate infolge von Refraktionseinflüssen entstehen können.



Figur 9: links:
Aufzeitschiessen mit Sprengung im Bohrloch und
Geophon-Auslage an der Erdoberfläche
rechts:
Well-shooting mit Bohrlochgeophon und Anregung
an der Erdoberfläche

5.12 P-Wellengeschwindigkeit und Auflockerungsgrad resp. Porosität

Die Auflockerung resp. die Porosität eines Gebirges kann nach der Formel von WYLLIE (1956) bestimmt werden. Dabei wird unter Porosität der Volumenanteil aller Hohlräume wie Poren, offene Klüfte und Risse, welcher nicht von Felsgestein eingenommen wird, verstanden.

$$\Delta t = \frac{1}{V_{\text{Geb}}} = \frac{\emptyset}{V_e} + \frac{1 - \emptyset}{V_{\text{Ma}}}$$

$\emptyset$ = Porosität

V_{Geb} = P-Wellen-Geschwindigkeit des Gebirges in m/s

V_{Ma} = P-Wellen-Geschwindigkeit der Gesteinsmatrix in m/s

V_e = P-Wellen-Geschwindigkeit des die Poren füllenden Mediums (Luft, Wasser, Öl) in m/s

Δt = Laufzeit-Gradient von P-Wellen im Gebirge in s/m

Das Verfahren wird vor allem für die Interpretation des Akustik-Logs bei Erdölbohrungen angewendet.

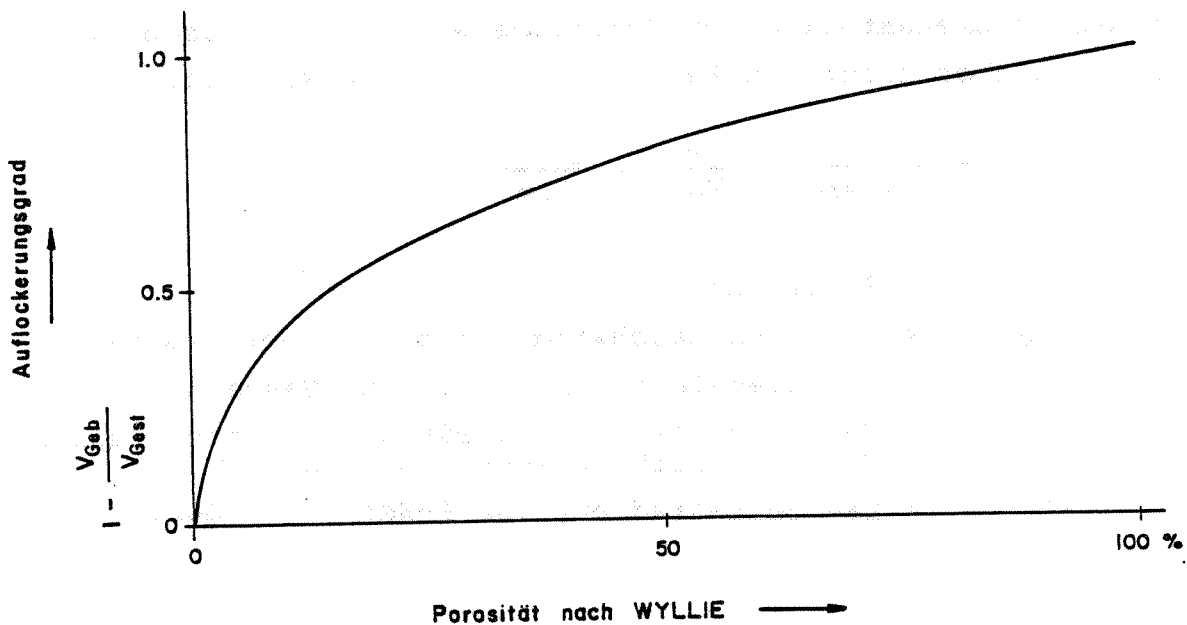
Auf ähnliche Art kann die Gebirgsauflockerung A durch Gegenüberstellung von Gebirgsgeschwindigkeit und Matrix(Gesteins-)geschwindigkeit bestimmt werden:

$$A = \frac{V_{\text{Gest}} - V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}} = 1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$$

V_{Geb} = Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer P-Wellen des quasi-homogenen Gebirges (ermittelt durch Messungen im Feld)

V_{Gest} $\approx$ V_{Ma} Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer P-Wellen im quasi-homogenen Probekörper (Kluftkörper, Bohrkern)

Der Zusammenhang zwischen Auflockerungsgrad A und Porosität nach WYLLIE ist aus Figur 10 ersichtlich.



Figur 10: Korrelation von seismisch ermitteltem Auflockerungsgrad und Porosität nach WYLLIE. Die Geschwindigkeit von Gestein V_{Gest} wurde mit 4000 m/s angenommen.

Medium in Klüften : Luft

Bei beiden Verfahren wird die "Bremsung" der elastischen Wellen durch das in den Klüften vorhandene Medium berücksichtigt. Normalerweise ist dies Luft (P-Wellengeschwindigkeit $V_e \approx 330$ m/s). Ist dieses Medium jedoch Wasser ($V_e \approx 1500$ m/s), wird der Kontrast zwischen den einzelnen Geschwindigkeiten geringer, die Interpretation bezüglich der Auflockerung schwieriger.

Zerklüftete, stark anisotrope Gebirge werden jedoch in ihren oberflächennahen Bereichen, in welchen ein Aushub normalerweise stattfindet, meist nicht wassergesättigt sein. Auf keiner der von uns untersuchten Baustellen in anisotrop-rigidem Fels wurden grundwasserführende Gebirge angetroffen. Diese Frage muss jedoch in jedem Fall berücksichtigt werden.

Da die effektive Grösse der Gebirgsporosität für unsere Anwendung nicht von Wichtigkeit ist, schlagen wir vor, den Auflockerungsgrad

$$A = 1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$$

zu berücksichtigen, so wie dies bei den untersuchten Baustellen getan wurde.

Dabei müssen selbstverständlich allfällig vorhandene Inhomogenitäten durch Gesteinswechsel berücksichtigt werden, indem A jeweils für die verschiedenen Bereiche einzeln bestimmt wird. Inhomogenitäten welche nur durch unterschiedliche Zerklüftung bedingt sind, müssen nicht unbedingt getrennt untersucht werden, da V_{Gest} kaum variiert.

Da die Grösse von A in erster Linie mit dem Kluftvolumen zusammenhängt, kann von A nicht unbedingt direkt auf den Zerklüftungsgrad des Gebirges geschlossen werden (siehe Seite 18).

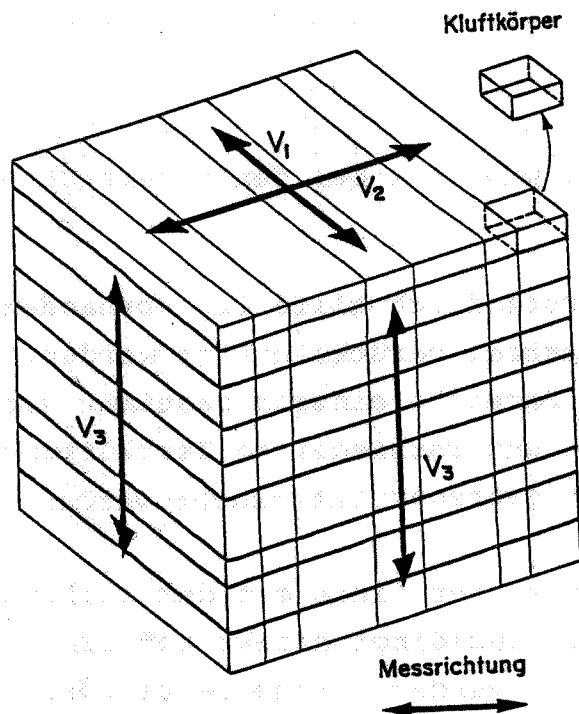
Bei der seismischen Bestimmung des Auflockerungsgrades muss im weiteren beachtet werden, dass die P-Wellen-Geschwindigkeit die Auflockerung linear in der Messrichtung wiedergibt.

Durch unterschiedliche Häufigkeiten verschiedener Kluftsysteme kann der Auflockerungsgrad von zerklüfteten Gebirgen in verschiedenen Richtungen grosse Unterschiede aufweisen, siehe auch BRUEGGEMANN und FAUST (1979) sowie SCHENK und SCHENKOVA (1973). Insbesondere unterscheidet sich oft die durch die Schichtung bedingte, meist ausgeprägte Klüftigkeit gegenüber derjenigen anderer Kluftsysteme (Figur 11, Seite 31).

Da die P-Wellengeschwindigkeit u.a. stark von der Wassersättigung (NUR and SIMMONS, 1969) des Gesteins abhängt, ist wichtig, dass V_{Gest} an bergfeuchten Proben bestimmt wird. Getrocknete Proben ergäben zu niedrige Geschwindigkeiten und würden damit einen zu grossen Auflockerungsgrad vortäuschen.

Der grosse Vorteil bei der Berücksichtigung des Auflockerungsgrades für die Beurteilung der Reissbarkeit liegt darin, dass mit A die Auflockerung jedes Gebirges unabhängig von den gesteinspezifischen Eigenschaften beschrieben werden kann.

$$V_3 < V_2 < V_1 \ll V_{\text{Kluftkörper}}$$



Figur 11: Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen in Abhängigkeit von der Messrichtung in einem tektonisch anisotropen Gesteinskomplex. Die Beziehung der "Gebirgsgeschwindigkeit" zur "Gesteinsgeschwindigkeit" ergibt den der Messrichtung entsprechenden linearen Auflockerungskoeffizienten.

5.2 Die Beschreibung der Gefügeverhältnisse

5.21 Die Kluftdichte

Die Kluftdichte wird durch Auszählen der durchtrennten Klüfte pro Laufmeter (m') bestimmt. Die Kluftdichten werden für die verschiedenen, vorhandenen Kluftsysteme getrennt untersucht, indem senkrecht zur Kluftstellung gezählt wird. Dabei werden jene Klüfte berücksichtigt, die einen hohen Durchtrennungsgrad aufweisen, d.h. bis zum Auftreffen auf ein anderes Kluftsystem durchsetzen. Es sind denn auch diese Klüfte, welche die Grösse der bewegbaren Kluftkörper bestimmen.

Die Erfahrung bei den untersuchten Baustellen hat gezeigt, dass die Kluftdichte der Hauptklüftung (Schichtung oder Schieferung) im wesentlichen die Abbaubarkeit beeinflusst. In vielen zerklüfteten Gebirgen kann zudem ein direkter Zusammenhang zwischen den Kluftdichten einzelner Systeme beobachtet werden: Zunehmende Schichtstärke hat meist geringer dichte Querklüftung zur Folge.

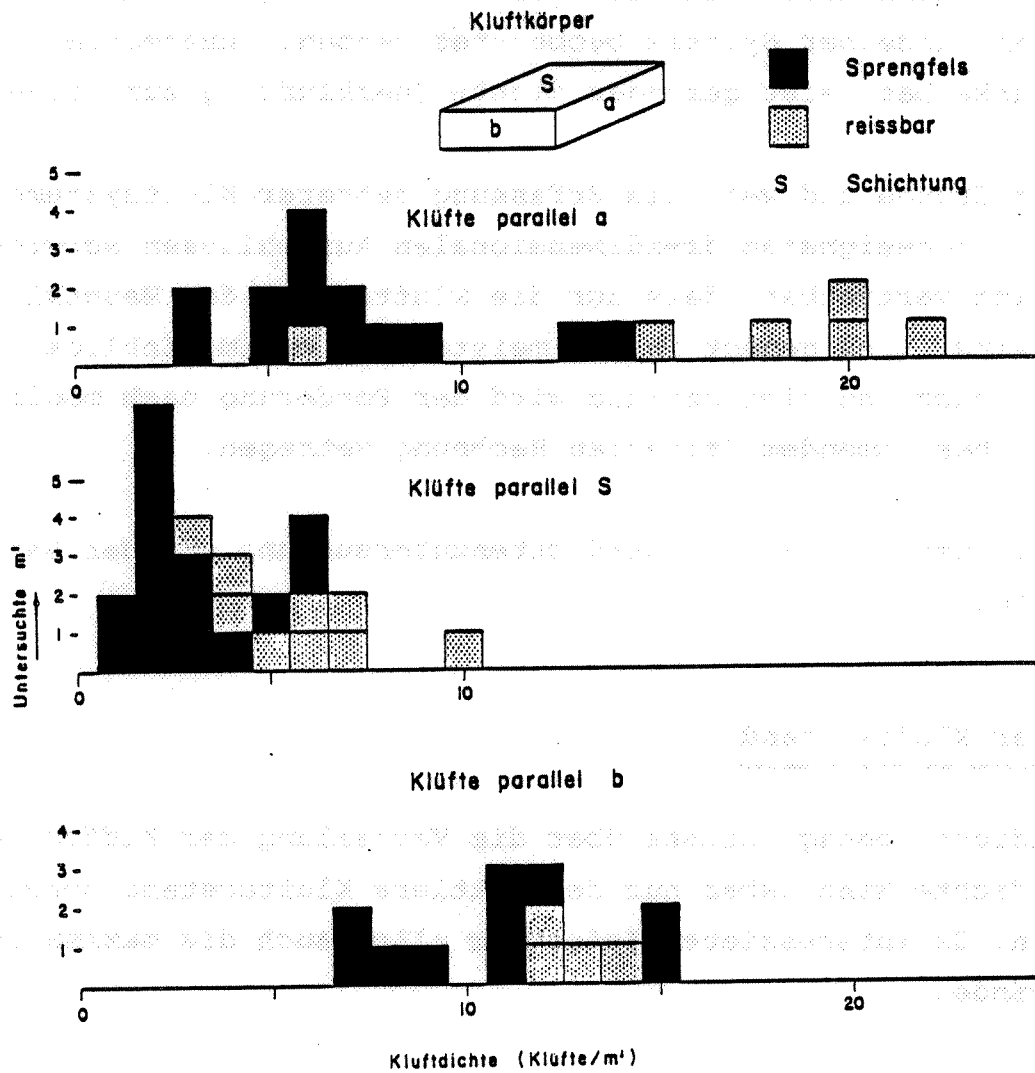
Aus diesem Grunde und weil die Erfassung mehrerer Kluftsysteme oft aus Mangel an geeigneten dreidimensionalen Aufschlüssen schwierig ist, scheint vertretbar, dass nur die Kluftdichte der Hauptklüftung bestimmt wird. Dies genügt in den meisten Fällen im Hinblick auf die Zielsetzung und gleichzeitig wird der Forderung nach möglichst einfach zu bestimmendem Kriterien Rechnung getragen.

Figur 12 illustriert eine Kluftdichtenuntersuchung auf der Baustelle Olten.

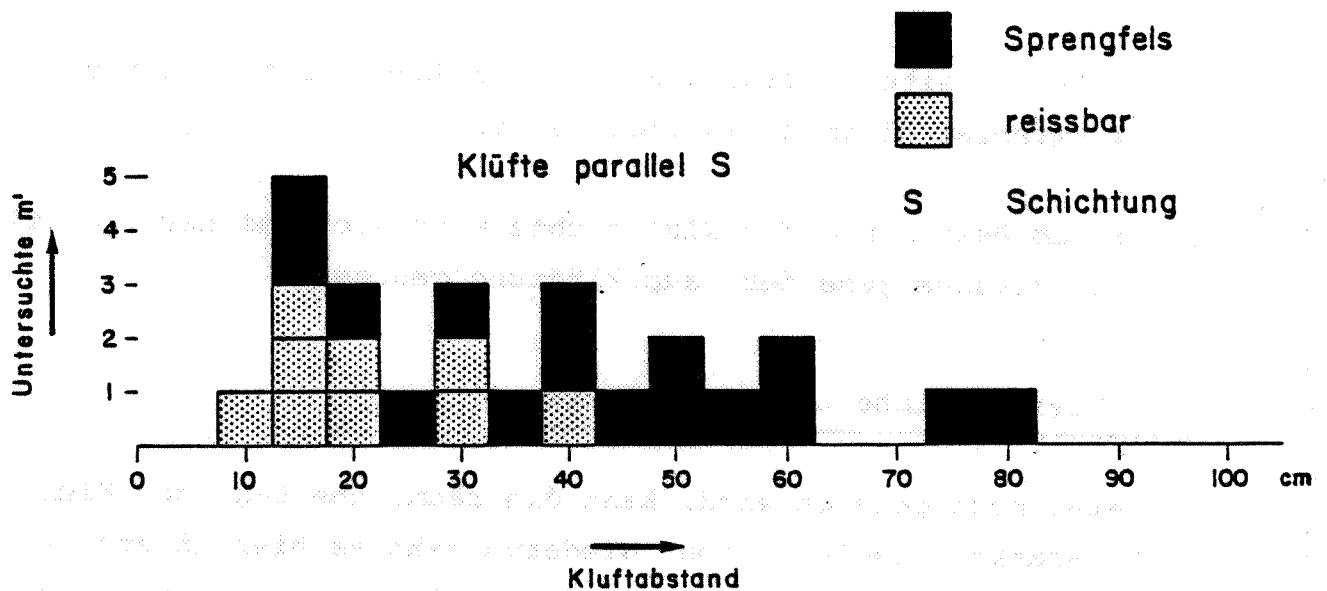
5.22 Der Kluftabstand

Die Kluftdichte besagt nichts über die Verteilung der Klüfte. Aus der Kluftdichte kann daher nur der mittlere Kluftabstand berechnet werden. Es interessieren jedoch vor allem auch die maximalen Kluftabstände.

In Figur 13, Seite 34 sind die auf der Baustelle Olten beobachteten Schichtstärken im Histogramm dargestellt. Daraus können Streuung, Häufigkeit der einzelnen Schichtstärken und die maximalen Kluftabstände abgelesen werden.



Figur 12: Kluftdichtenuntersuchung, Baustelle Olten (Nr. 27)



Figur 13: Baustelle Olten : Beobachtete Kluftabstände

Tabelle 4 : Baustelle Olten, Kluftabstände

	Bereich Ripperfels	Bereich Sprengfels
mittlere Kluftabstände aus Kluftdichte // s	0.15 m	0.40 - 0.50 m
// a	0.12 m	0.05 - 0.06 m
// b	0.10 m	0.07 m
grösste Bankungs- mächtigkeit // s	0.40 m	0.80 m
mittlere Bankungs- mächtigkeit // s	0.15 m	0.50 - 0.60 m

In Tabelle 4, Seite 34 sind die Kluftabstände (Kluftkörperabmessungen) für das Beispiel Olten zusammengestellt.

Wie bei der Bestimmung der Kluftdichte wird auch bei der Ermittlung der Kluftabstände jene der Hauptklüftung genügen.

5.33 Die räumliche Lage der Klüfte

Wie später noch gezeigt wird, kann die räumliche Lage der Klüfte die Reissbarkeit beeinflussen. Wiederum geht es hier in erster Linie um die Stellung der Hauptklüftung. Dabei genügt eine grobe Unterscheidung des Einfallens der Schichtung oder Schieferung:

- horizontal bis leicht geneigt (bis 30°)
- stark geneigt ($> 30^\circ$)

Die Richtung des Streichens und des Einfallens der Hauptklüftung ist vorallem für die Bestimmung der optimalen Reissrichtung von Bedeutung.

5.34 Notwendige Aufschlüsse für die Untersuchung der Gefügeverhältnisse

Im Gegensatz zur Oberflächenseismik, sind für die Bestimmung der Gefügeverhältnisse und der P-Wellengeschwindigkeit des Gesteins Fels-Aufschlüsse notwendig.

Diese können als natürliche Aufschlüsse in der Nähe der Baustelle bereits vorhanden sein. In den meisten Fällen wird es jedoch nicht möglich sein, das Gebirge zu untersuchen, ohne dass Schlitze oder Bohrungen abgeteuft werden.

Mit Schlitzen können nur oberflächennahe Bereiche erfasst werden und der Geologe muss entscheiden, in wie weit diese Verhältnisse nach der Tiefe extrapolierbar sind (dies gilt auch für entferntere natürliche Aufschlüsse).

Werden Bohrungen abgeteuft, so können hier die Kluftdichten und die Kluftabstände der Hauptklüftung bestimmt werden. An Bohrproben kann zudem V_{Gest} gemessen werden. Im weiteren können mit Bohrungen allfällige Inhomogenitäten des Gebirges abgeschätzt werden.

Falls weder natürliche Aufschlüsse noch Schlitze oder Bohrungen zur Verfügung stehen und nur Gebirgsgeschwindigkeiten gemessen werden können, kann V_{Gest} aufgrund von Erfahrungen geschätzt und so der Auflockerungsgrad bestimmt werden. Eine Reissbarkeitsprognose wird jedoch für harte und rigide Felsarten problematisch sein, wenn die Gefügeverhältnisse nicht berücksichtigt werden können, es sei denn die Gebirgsgeschwindigkeit V_{Geb} liege extrem niedrig.

6. AUSWERTUNG VON BAUERFAHRUNGEN

6.1 Auswahl der Baustellen

Bedingt durch unser Untersuchungskonzept, waren wir auf Baustellen angewiesen, welche kurz vor der Eröffnung standen oder die Arbeiten bereits im Gange waren. Zugleich waren wir bestrebt, möglichst viele Baustellen erfassen und damit statistisch auswerten zu können.

Ein grosses Angebot an Untersuchungsobjekten ergab sich durch die rege Bautätigkeit im Nationalstrassenbau. Da sich diese jedoch vorwiegend auf das Schweizerische Mittelland konzentrierte (Molas-segesteine) wurden zusätzlich Baustellen aus dem Jura, z.T. jenseits der Landesgrenzen (A 36) miteinbezogen.

Die Lage der untersuchten Baustellen ist im Uebersichtsplan Anhang 1 dargestellt. Weitere geologische und technische Angaben sind in den Tabellen, Anhang 2 - 9 enthalten.

6.2 Ausgeführte Untersuchungen

Die Untersuchungen umfassten für jede Baustelle:

- Geologische Aufnahme
 - Felsart
 - Gefügeverhältnisse
- Geophysikalische Messungen
 - Messung der P-Wellengeschwindigkeiten des Gebirges
 - Messung der P-Wellengeschwindigkeiten des Gesteins durch Ultraschallmessungen im Labor
- Aufnahme von Bauerfahrungen
 - Eingesetzter Gerätetyp
 - Abbauleistungen

Zusätzlich wurden in bestimmten Fällen weitere Untersuchungen am Gestein (Raumgewichte) oder spezielle geophysikalische Verfahren z.B. well-shooting ausgeführt.

6.3 Untersuchte Felsarten

6.31 Allgemeines

Die für die Untersuchung wünschbaren Felsarten konnten wir nicht frei auswählen, da wir auf das zur Verfügung stehende Baustellenangebot angewiesen waren. Dies hatte zur Folge, dass praktisch keine alpinen Felsarten untersucht werden konnten.

Unsere Studien konzentrierten sich denn gezwungenermassen vorallem auf folgende Gesteine:

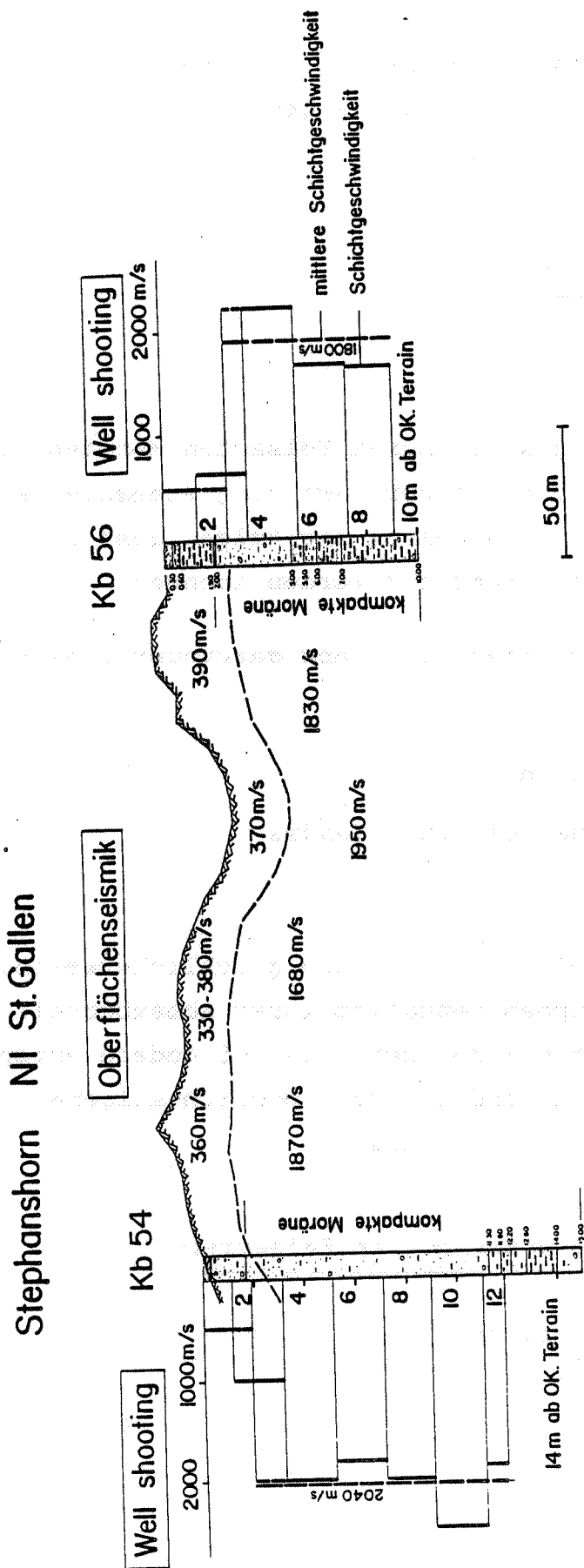
- . Moräne, Nagelfluh
- . Molassegesteine des Mittellandes
- . Jura-Kalke

Im Laufe der Arbeiten zeigte sich jedoch glücklicherweise, dass die untersuchten Gesteinsgruppen bezüglich ihrer Abbaubarkeit spezifische und typische Eigenschaften aufweisen, die auf andere entsprechende Felsarten übertragbar sind und es wurde möglich, allgemein gültige Abbaubarkeitskriterien zu formulieren.

6.32 Beschreibung der untersuchten Felsarten

6.321 Felsart I, quasi-isotrop: Moräne, Nagelfluh

Diese Felsart ist im allgemeinen durch das Fehlen eines Gesteinsgefüges charakterisiert. Der isotrope Charakter zeigt sich unter anderem darin, dass die seismischen Geschwindigkeiten V_{Gest} und V_{Geb} einander sehr ähnlich sind, d.h. dass die letztere nicht durch Diskontinuitäten eines Gefüges verringert wird (Figur 14, Seite 39).



Figur 14: Ergebnisse von Oberflächenseismik und Well-shooting in einem praktisch homogenen und isotropen Moräne-Gesteinskomplex. Horizontal und vertikal gemessene Fortpflanzungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen variieren wenig.

Die Eigenschaften dieser Felsart bezüglich der Abbaubarkeit wird im wesentlichen durch die Verbandsfestigkeit des Gesteins bestimmt. Die Grösse der Verbandsfestigkeit ist primär durch Vorbelastung und diagenetische Prozesse bedingt. Sekundär kann sie durch spätere Verwitterungsvorgänge verringert werden.

Entscheidend ist die Grösse der Kohäsion der Matrix, welche die Kies-, Stein- oder Blockkomponenten zusammenhält.

Die Abbaubarkeit dieser Gesteine kann durch inhomogenen Aufbau wie Einlagerungen von weniger kohäsiven Schichten (z.B. Sandlagen in der Moräne) begünstigt werden.

6.322 Felsart II, anisotrope Weichgesteine:
Mittelländische Molasse - Sandsteine und -Mergel

Charakteristisch für diese Felsart ist die relativ geringe primäre Verbandsfestigkeit und die ausgeprägte Verwitterungsanfälligkeit der Gesteinsmatrix.

Diese ausgeprägte Verwitterungsanfälligkeit hat ihre Ursache in der hohen Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit. Das eindringende Wasser kann den kalkigen Gesteinszement lösen, wodurch die Gesteinsfestigkeit verringert wird. Untersuchungen über die Gesteinsverwitterung von GSCHWIND und NIGGLI (1931) zeigen für verwitterte Molassegesteine deutlich erniedrigte Kalkgehalte. Die ausgeprägte Verwitterungsanfälligkeit zeigt sich in mehr oder weniger herabgesetzten Raumgewichten und Gesteins-P-Wellengeschwindigkeiten (Figur 15, Seite 43 und Figur 18, Seite 49).

Die Molasse-Gesteine des Mittellandes unterscheiden sich damit sehr deutlich von geologisch älteren Felsarten wie Flyschsandsteinen, Kalken und Gneisen, welche sich durch eine geringe Wasseraufnahme und Verwitterungsanfälligkeit der Gesteinsmatrix auszeichnen (Tabelle 4, Seite 41).

Tabelle 4
Technische Eigenschaften einiger Gesteinstypen

(nach DE QUERVAIN, 1969)

Gesteinstyp	absolute Porosität %	Wasseraufnahme %	Druckfestigkeit kp/cm ²
Moräne	25		5 - 10
Molasse-Sandsteine des Mittellandes	16 - 20	5 - 8	250 - 400
Sandsteine der subalpinen Molasse (granit. Sandstein, Plattensandstein)	1 - 11	2 - 3,5	500 - 1800
Flyschsandstein	1,5 - 3	0,1 - 0,2	1800 - 2700
Jura-Kalke (Malm)	3 - 5	0,1 - 1	1000 - 1500
Granit-Gneis	<3	<1	>1500

Eine Ausnahme bilden die seltenen, relativ harten und rigiden Süßwasserkalke der Molasse. Aufgrund ihrer Eigenschaften ähneln sie den Kalken des Juras oder der Alpen und sind der Felsart III (Seite 42) zuzuordnen.

Die Gefügeanisotropie manifestiert sich vor allem durch die Schichtung, wogegen Querklüftungen eher untergeordnet vorhanden sind. Die geringe Festigkeit und eine gewisse Plastizität der Molassegesteine des Mittellandes ist wahrscheinlich der Grund, dass diese durch die alpine Tektonik oft weniger zerklüftet wurden. Sie verhielten sich als mehr oder weniger inkompetente Formationen gegenüber tektonischer Beanspruchung weniger rigid (spröde) als die kompetenten älteren Flysch-Sandsteine, Kalke und Gneise. Die Klüfte der Molassegesteine sind meist nur wenig geöffnet oder mit Verwitterungsprodukten gefüllt.

Typisch für die Molassegesteine ist die oft zu beobachtende Wechsel-lagerung von verschiedenen zusammengesetzten Gesteinen, wie Mergel sandigen Mergeln, mergeligen Sandsteinen und Mergeln.

Die Beobachtungen auf den untersuchten Baustellen haben gezeigt, dass je nach Verbandsfestigkeit des Gesteins diese selbst oder aber die Gefügeanisotropie für die Abbaubarkeit die dominierende Rolle spielt. In vielen Fällen dürften beide Faktoren bestimmend sein.

Die Molassegesteine des Mittellandes nehmen damit - mit Ausnahme der bereits erwähnten Süsswasserkalke - eine Sonderstellung zwischen den isotropen und anisotrop-rigiden Felsarten ein.

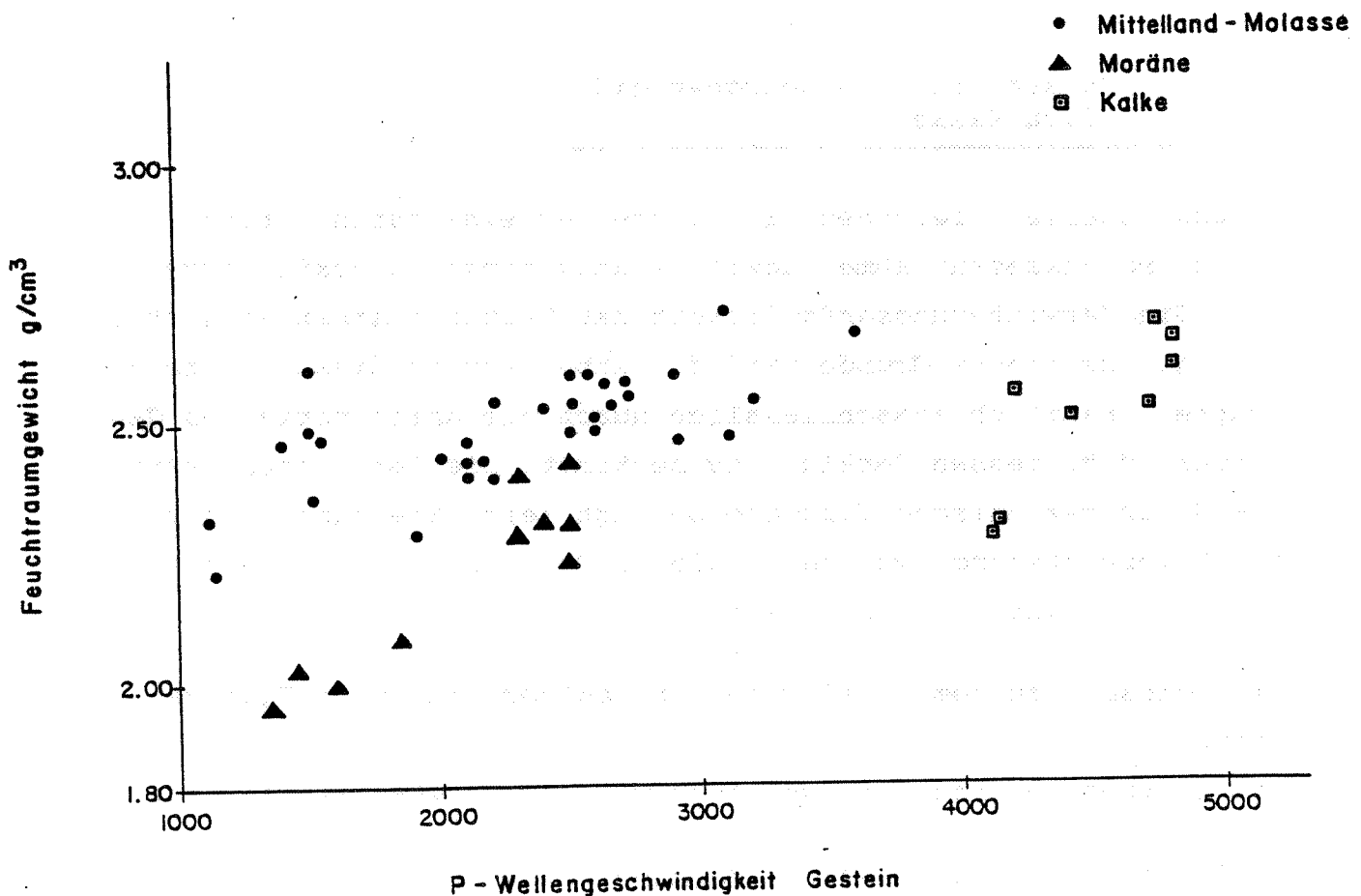
6.323 Felsart III, anisotrop-rigid:
 Jura-Kalke

Gemäss Tabelle 4 zeichnen sich diese Gesteine durch geringe Porosität und Wasseraufnahme, sowie relativ grosse Druckfestigkeiten aus. Die Verwitterungsanfälligkeit der Gesteinsmatrix an sich ist gering. Aus diesem Grunde wird die Abbaubarkeit dieser Gesteinsgruppe praktisch ausschliesslich durch die Anisotropie des Gebirges, d.h. dessen Zerklüftung bestimmt. Die Zerklüftung kann primär durch tektonische Vorgänge bedingt sein. Sie kann zusätzlich durch Verwitterung, welche in diesen Gesteinen über latent vorhandene Klüfte wirkt, erhöht sein.

Im Gegensatz zu dem im allgemeinen weniger kompakten Fels der mittelländischen Molasse sind die Klüfte in den rigiden Gesteinen oft stärker geöffnet und seltener mit Lockermaterial gefüllt.

In Figur 15, Seite 43 werden Raumgewicht und P-Wellengeschwindigkeit der Gesteinsmatrix (Probekörper) von Moräne, Molasse und Kalcken verglichen. Man erkennt die grosse Streuung der Geschwindigkeiten bei Moräne und Molasse zwischen 1000 m/s und 3500 m/s.

Zweifellos kommen noch tiefere Geschwindigkeiten vor, doch sind sie wegen der schlechten Gesteinsqualität kaum messbar. Raumgewicht und P-Wellengeschwindigkeit sind bei Moräne und Molasse ein Indikator für den Verwitterungsgrad des Gesteinsbereiches. Die Geschwindigkeiten stehen hier in einem direkten Zusammenhang mit dem Raumgewicht. Bei den Kalken ist dagegen nur eine geringe Streuung der Geschwindigkeiten erkennbar. Die Unterschiede sind primär durch unterschiedliche Porosität bedingt. Ein stärkerer Einfluss der Verwitterung wird Mikrorisse aktivieren, das Gestein an sich und damit Raumgewicht und P-Wellengeschwindigkeit der Gesteinsmatrix im allgemeinen wenig beeinflussen.



Figur 15: Korrelation von Raumgewicht und P-Wellengeschwindigkeit der Gesteinsmatrix von Moräne, Molassegestein und Jurakalken

Zur Gruppe der Felsart III, anisotrop-rigid gehören abgesehen von den Jurakalken folgende Gesteine:

- härtere Süsswasserkalke der Molasse (selten, z.B. Süsswasserkalke des Chattien bei Wynau)
- harte Sandsteine der subalpinen Molasse (Plattensandsteine, granitische Sandsteine, Appenzellersandsteine)
- Flyschgesteine
- Bündnerschiefer
- Kalke und Mergel der Alpen
- Granite, Gneise und andere Kristallingesteine

Gemeinsam für diese Gesteinsformationen ist, dass ihre Abbaubarkeit praktisch nur durch Art und Ausmass der Zerklüftung bestimmt wird.

6.4 Zusammenhang zwischen P-Wellengeschwindigkeit und Reissbarkeit

6.4.1 Allgemeines

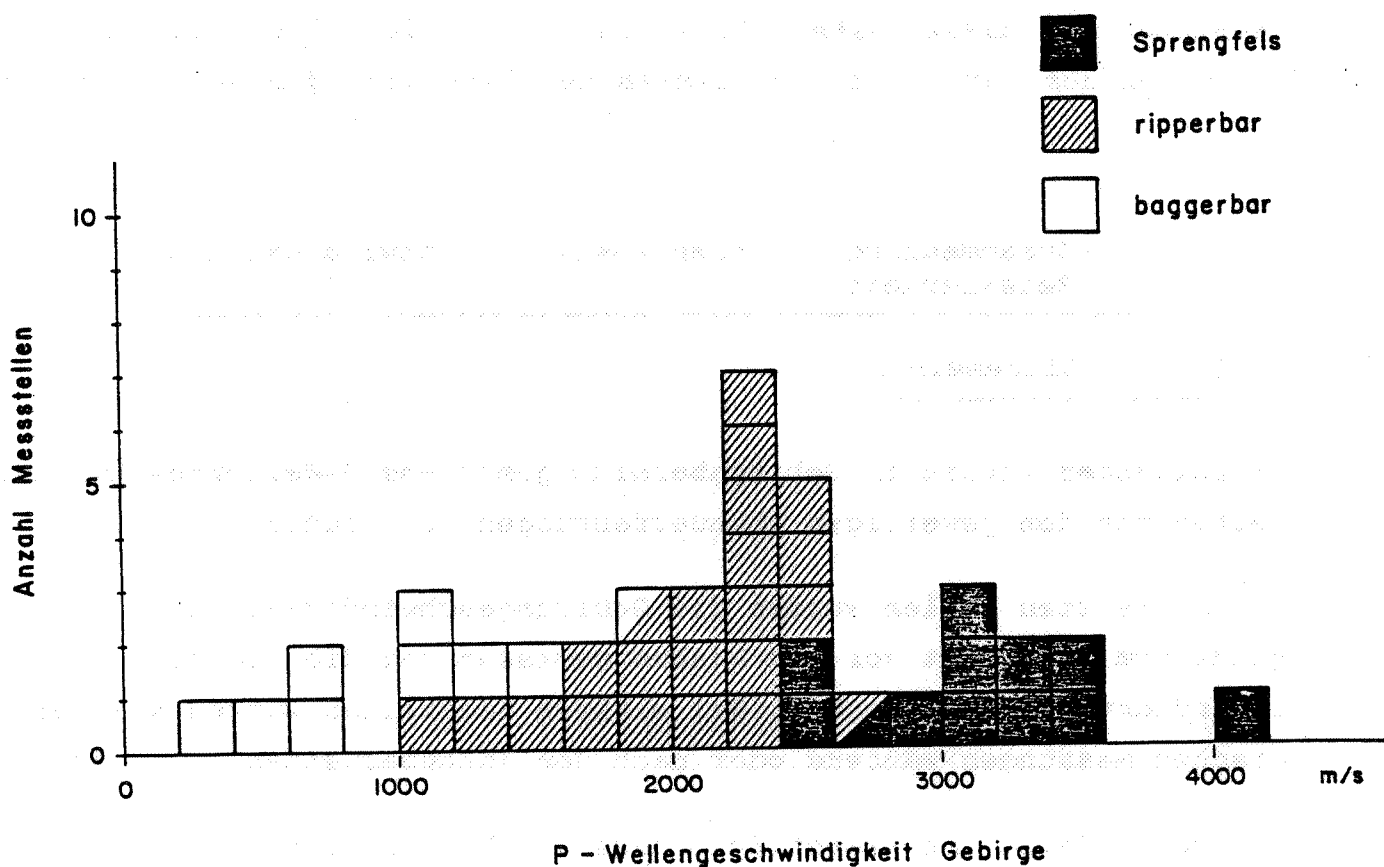
Im folgenden werden im Gebirgsbereich gemessene P-Wellengeschwindigkeiten mit den jeweiligen Abbauerfahrungen verglichen.

In den meisten Fällen wurden die Gebirgsgeschwindigkeiten zu irgendeinem Zeitpunkt vor dem Aushub gemessen und die späteren Abbauerfahrungen ausgewertet. Bei einigen Baustellen wurden die seismischen Messungen während oder nach den Aushubarbeiten ausgeführt.

Für beide Fälle ist wesentlich, dass wir keinerlei Einfluss auf die Abbaumethoden und eingesetzten Abbaumaschinen hatten. Wir betonen dies deshalb, weil auch andere, rein unternehmerische Kriterien den Abbauvorgang und den Maschinentyp beeinflussen können und es sicher auch tun.

Es wäre zwar wünschenswert gewesen, auf den untersuchten Baustellen die Effizienz verschiedener Abbau-Methoden und -Maschinen zu prüfen. Die Untersuchungsergebnisse hätten damit an Objektivität gewonnen. Doch liess der finanzielle Rahmen dies nicht zu.

Die gemessenen P-Wellengeschwindigkeiten reichen von 300 bis 5000 m/s, die gemachten Abbauerfahrungen von baggerbar bis Sprengfels.



Figur 16: Abbaubarkeit und Gebirgs-P-Wellengeschwindigkeit von Moräne und Molassegesteinen

6.42 Felsarten I und II: Moräne und Mittelland-Molasse

Figur 15, Seite 45 zeigt den Zusammenhang zwischen P-Wellengeschwindigkeit und Abbauerfahrung in Moräne und Molasse-Gesteinen.

Die Grenzen ergeben sich dabei recht eindeutig:

- baggerbar bei $V_{\text{Geb}} < 1500 \text{ m/s}$

- reissbar bei $V_{\text{Gest}} < 2500 \text{ m/s}$

Differenziert nach Gesteinsgruppen (Figur 17, Seite 48):

Gesteinsgruppe	baggerbar	reissbar
Moräne	< 1500 - 1600 m/s	< 2400 - 2600 m/s
Mittelland-Molasse		< 2700 - 2800 m/s

Die Grenze der Reissbarkeit scheint bei den Molasse-Gesteinen höher zu liegen als bei Moräne und Nagelfluh. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Reissbarkeit der Molasse zumindest in einigen Fällen durch Schichtung und Klüftung begünstigt wird, ohne dass diese selbst einen stark vermindernenden Einfluss auf die Geschwindigkeit der P-Wellen ausübt (vorwiegend geschlossene Klüfte oder gefüllte Klüfte, siehe auch Abschnitt 6.33).

Vergleicht man unsere Beobachtungen mit CATERPILLAR 1966 (siehe Figur 2, Seite 6), so findet man die für "Moräneschutt" und "Sandstein" angegebenen Reissbarkeitsgrenzen (D9) bei 2000 resp. 2600 m/s, mit "marginal"-Bereichen bis 2450 resp. 3200 m/s.

CATERPILLAR zeigt also ebenfalls bei Sandsteinen gegenüber Moräne höher liegende Geschwindigkeitsgrenzen der Reissbarkeit. Wir haben jedoch in keinem Fall reissbare Molasse mit Geschwindigkeiten > 2800 m/s festgestellt.

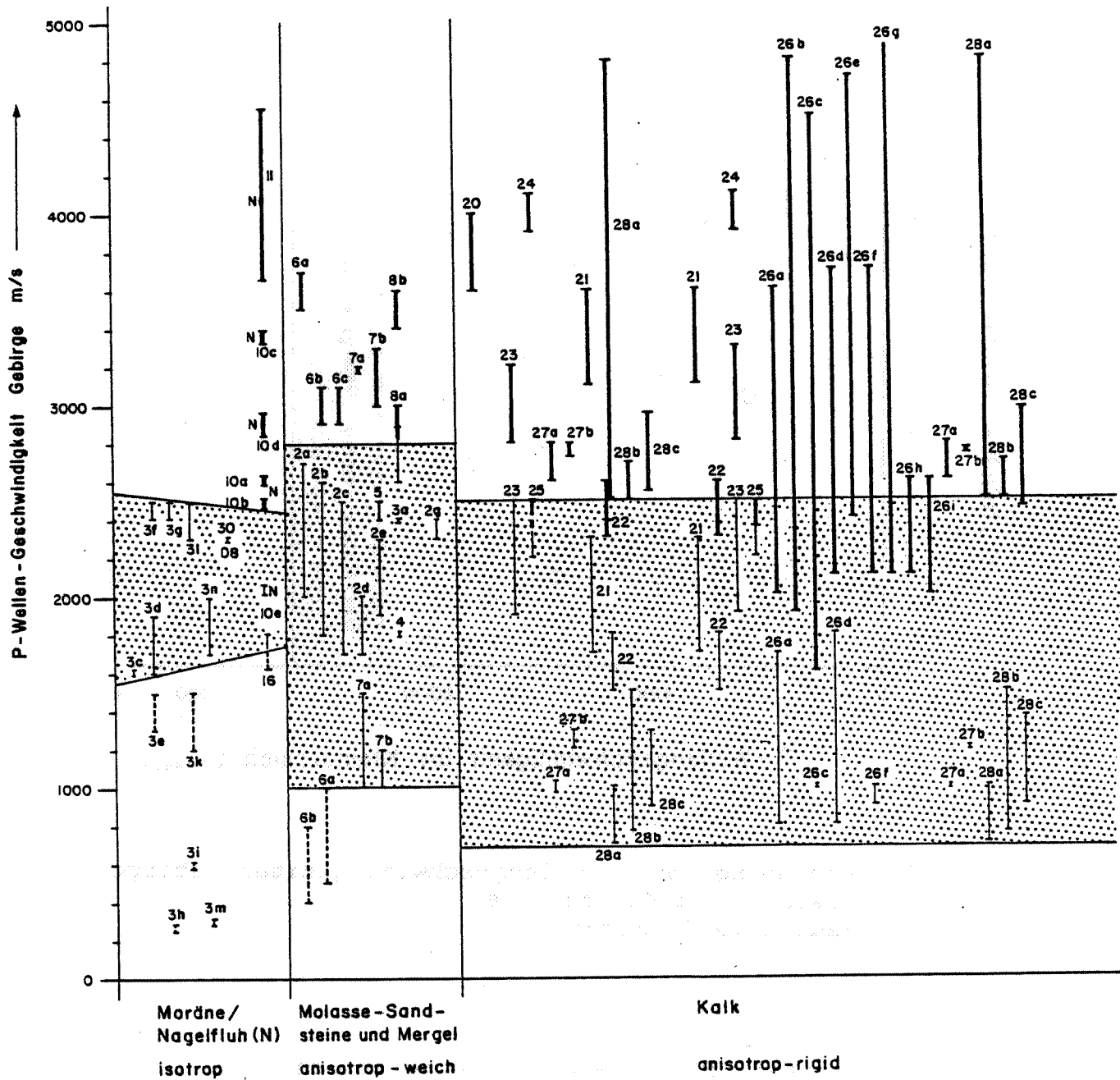
Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die amerikanischen Sandsteine einerseits grössere Gesteinsmatrix-Geschwindigkeiten aufweisen (analog unseren Platten- und Flyschsandsteinen) und andererseits eine ausgeprägtere Gefügeanisotropie die Abbaubarkeit begünstigt.

Die von CATERPILLAR angegebene Reissbarkeitsgrenze für Moräne stimmt dagegen recht gut mit unseren Befunden überein, liegt aber eher etwas tiefer.

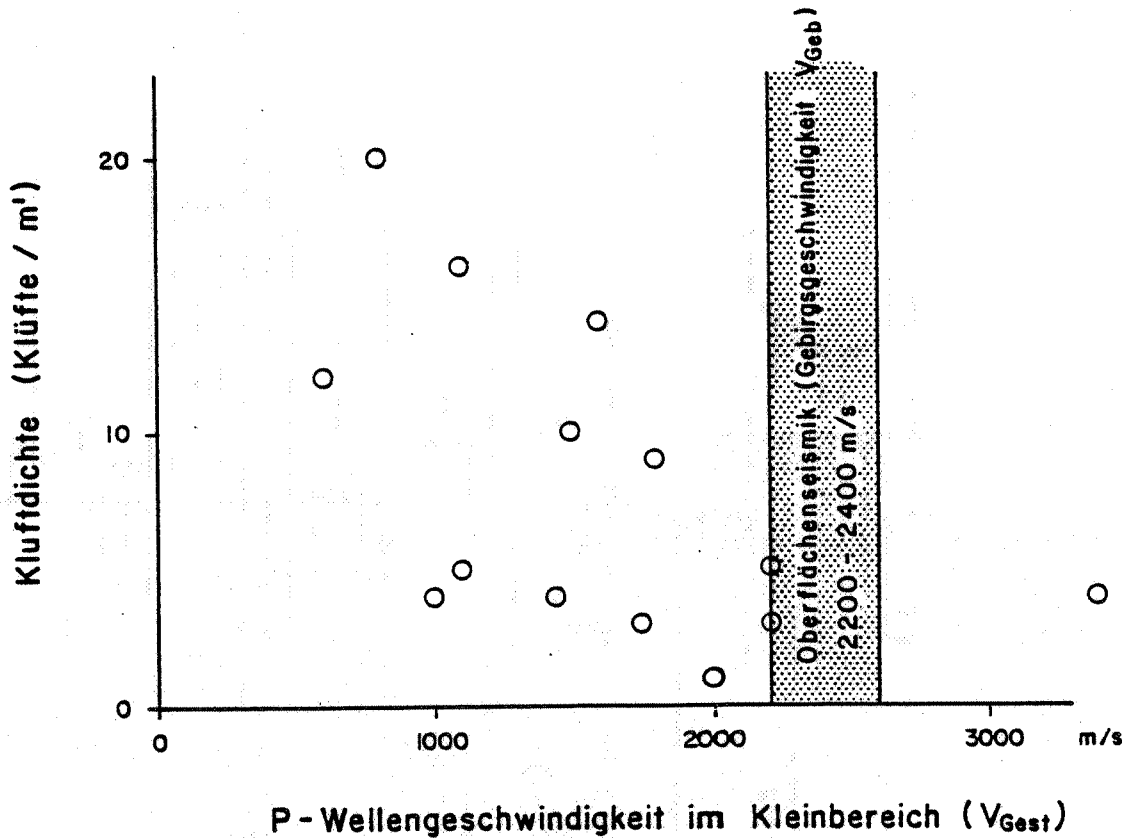
Vergleichen wir unsere Reissbarkeitsgrenzen mit der "Rippability rating chart" von WEAVER (1975, Tabelle 1, Seite 8) stellen wir recht weit auseinandergehende Geschwindigkeiten fest: WEAVER gibt die Grenze - in Kombination mit anderen Parametern - bei 2150 m/s an, liegt also weit unter unseren Werten.

Zu Problemen bei der Interpretation von seismischen Gebirgsgeschwindigkeiten kann die oft ausgeprägte Inhomogenität infolge Wechsellagerung verschiedener Gesteine führen (siehe Figur 5 Seite 13). Die an der Oberfläche gemessene Geschwindigkeit entspricht dann oft der Geschwindigkeit der kompaktesten Bank, wie dies der Vergleich von Oberflächenseismik und Wellshooting bei der Baustelle N1 Neufeld deutlich illustriert (Figur 8, Seite 26). Bei der Baustelle N5/Birchi (Figur 18, Seite 49) manifestiert sich die vorhandene ausgeprägte Wechsellagerung in sehr unterschiedlichen Gesteins-Geschwindigkeiten, die mit sehr wenigen Ausnahmen alle unter der Geschwindigkeit der Oberflächenseismik liegen. Offensichtlich bestimmen die wenigen Schichtpakete mit den höchsten Gesteinsgeschwindigkeiten um 2200 m/s die Gebirgsgeschwindigkeit.

Fazit: In inhomogenen Gebirgen der Molasse können Gebirgsgeschwindigkeiten kompakten Fels vortäuschen, obschon sie möglicherweise nur einer einzelnen kompakten Bank in relativ weicher Umgebung entsprechen.



Figur 17: P-Wellen-Geschwindigkeit des Gebirges und Abbaubarkeit verschiedener Gesteinsformationen



Figur 18 : Beziehung von P-Wellengeschwindigkeiten Gebirge /
Gestein, und Kluftdichte.
Baustelle N5/Birchi.

6.43 Felsart III: Jurakalke (anisotrop-rigid)

Im Gegensatz zu Moräne und Molasse fällt die Grenze Reissbarkeit/
Sprengfels bei den anisotrop-rigiden Gesteinen nicht mit einem
engen Geschwindigkeitsbereich zusammen (Figur 15, Seite 45). So
wurden zwischen 1600 - 2500 m/s sowohl reissbare wie nicht mehr
reissbare Felsarten beobachtet.

Oberhalb ca. 2600 m/s scheinen die untersuchten Kalke nicht mehr reissbar zu sein. Im Vergleich dazu gibt CATERPILLAR (1966) die Grenze der Reissbarkeit im Bereich zwischen 2500 - 3150 m/s ("marginal"-Bereich, Figur 2, Seite 6).

WEAVER's (1975) Reissbarkeitsgrenze (Tabelle 1, Seite 8) liegt mit 2150 m/s ungefähr in der Mitte des von uns gefundenen Grenzbereichs.

6.5 Zusammenhang zwischen seismisch ermitteltem Auflockerungsgrad und Reissbarkeit

Gemäss Abschnitt 5.12 kann anhand der P-Wellengeschwindigkeiten des Gebirges und des Gesteins der Auflockerungsgrad A bestimmt werden:

$$A = 1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$$

Die Bestimmung des Auflockerungsgrades ist in erster Linie für stark anisotrope, rigide Gesteine zweckmässig. Bei diesen Felsarten ist V_{Gest} (für einen bestimmten Gesteinstyp) relativ konstant, da kaum von der Verwitterung beeinflusst. Der Auflockerungsgrad A ist hier ein direkter Indikator für das Ausmass der Zerklüftung.

Im Gegensatz dazu ist die Bestimmung von A bei anisotropen Weichgesteinen (Molasse) problematisch, da bei dieser Felsart wegen der meist ausgeprägten Wechsellagerung verschiedener Gesteinstypen und der den Gesteinsbereich unterschiedlich angreifenden Verwitterung stark streuende V_{Gest} beobachtet werden (Figur 18, Seite 49).

Die erwähnte Figur zeigt allerdings eine deutliche Abhängigkeit zwischen Kluftdichte und Gesteins-Geschwindigkeit.

Letztere ist jedoch zugleich ein Hinweis für den Grad der Verwitterung des Gesteinsbereiches. $A = 1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$ könnte für diesen Fall nicht sinnvoll bestimmt werden, da V_{Gest} meist kleiner ist als V_{Geb} . A würde somit negativ.

Für Molasse ist daher die Ermittlung eines repräsentativen Auflockerungsgrades in den meisten Fällen kaum möglich und wenig sinnvoll.

In Figur 19, Seite 52 sind die festgestellten Auflockerungsgrade stark anisotroper Gesteine aufgetragen. Sie streuen von 0-0.8. Gemäss Diagramm Figur 10 Seite 29 (Beziehung Auflockerungsgrad - Porosität nach WYLLIE) entspricht dies einer Gebirgsporosität von 0 - 60 %.

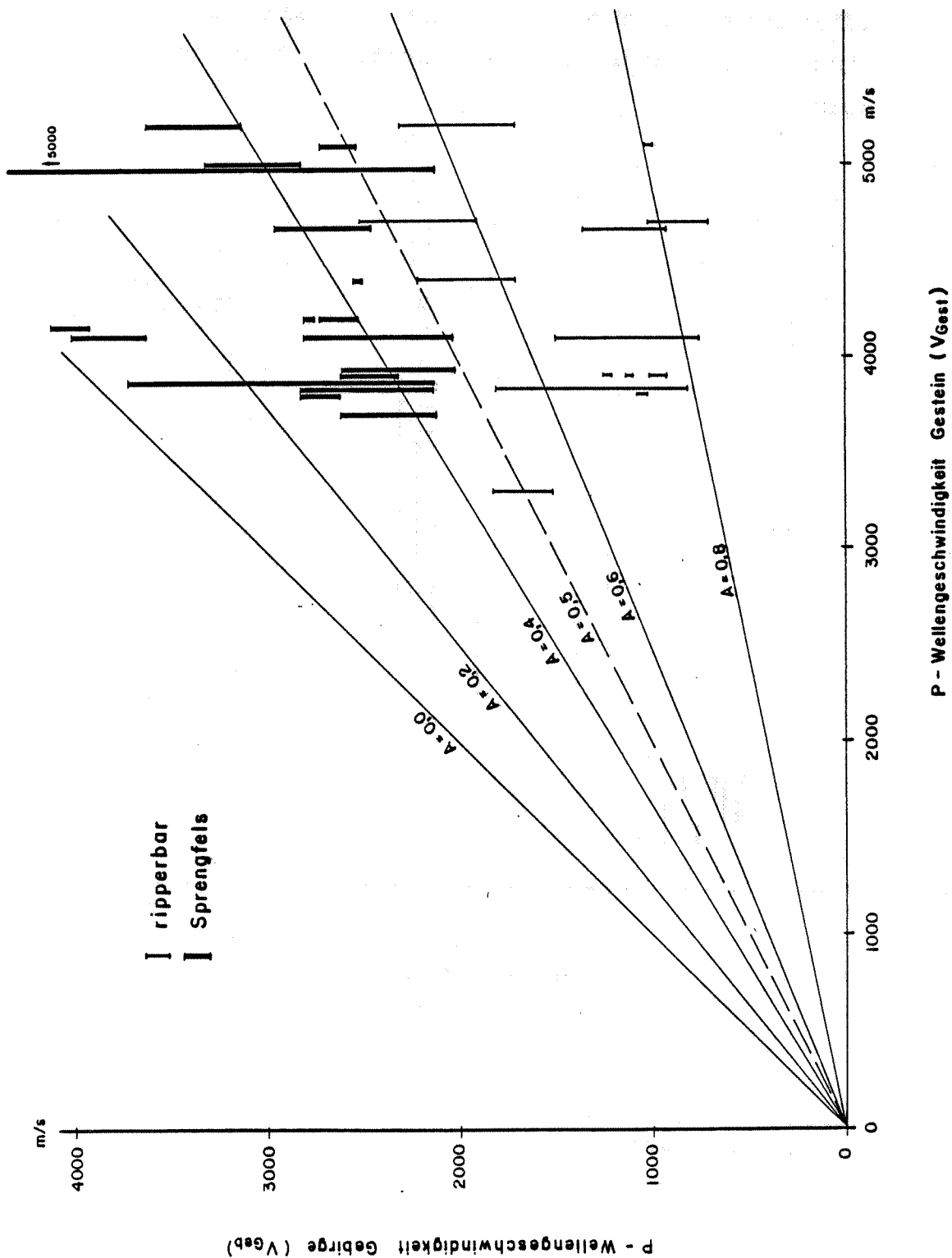
Vergleicht man Auflockerungsgrad und Reissbarkeit, ergibt sich eine recht deutliche Abgrenzung bei $A = 0.5$, die nur in einem Fall (26 g, mit äusserst stark streuenden Geschwindigkeitswerten !) unterschritten wird.

6.2 Zusammenhang zwischen Kluftdichte und Reissbarkeit

Auflockerungsgrad und Gebirgsporosität stehen streng genommen nur in direkter Beziehung zum Kluftvolumen, nicht aber zur Kluftdichte.

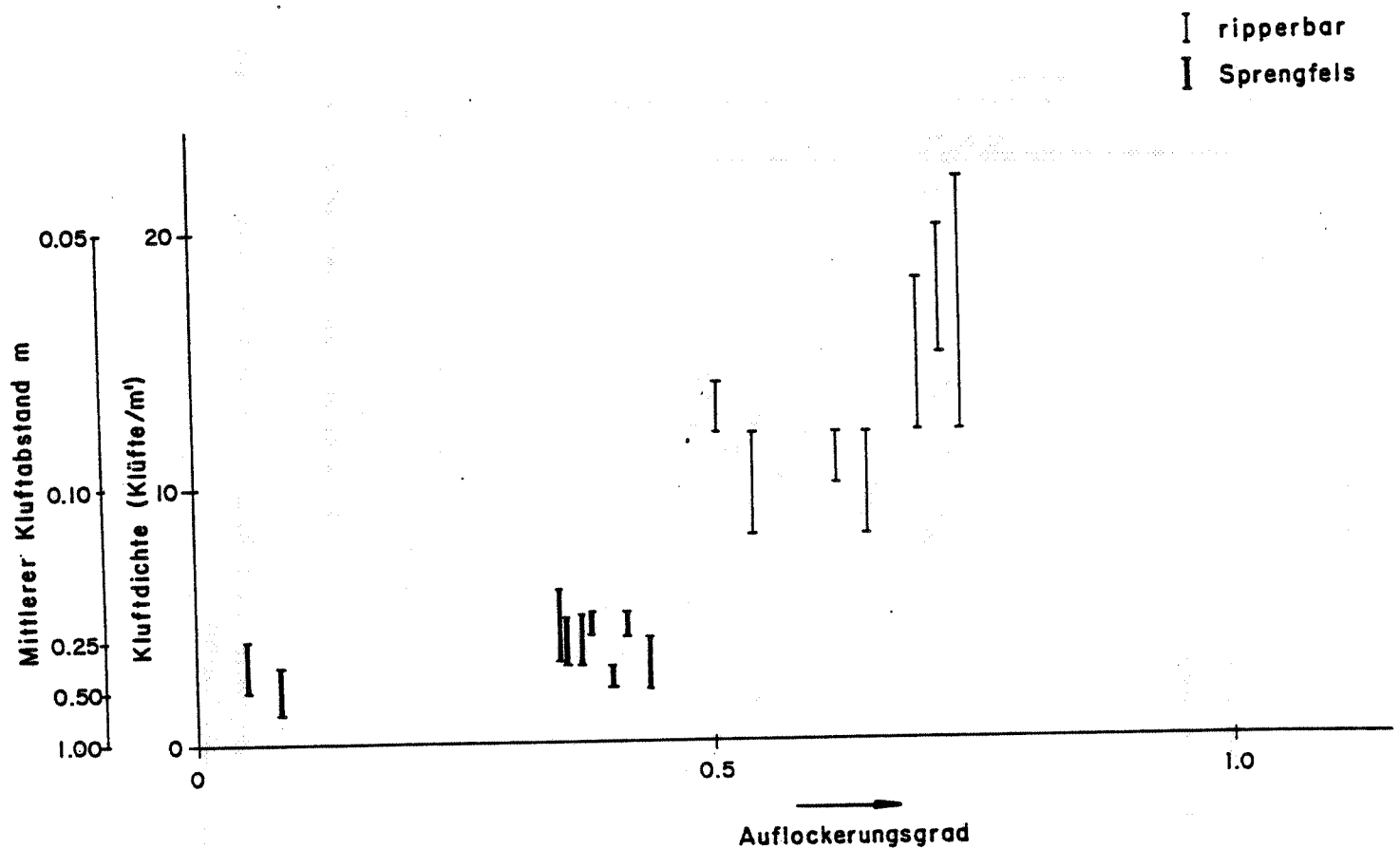
Ein hoher Auflockerungsgrad resp. eine grosse Porosität kann einerseits durch wenige, aber weit geöffnete oder viele, enge Klüfte bedingt sein. Die Oeffnungsweite durchtrennter Kluftflächen ist jedoch für die Reissbarkeit nicht von Bedeutung. Die Verwendung des Auflockerungsgrades für Reissbarkeitsprognosen kann daher möglicherweise irreführend sein.

Mit der Einführung des für die Reissbarkeit äusserst wichtigen Faktors Kluftdichte kann dieses Problem überbrückt werden.



Figur 19: Auflockerungsgrade und Abbaubarkeit anisotrop-rigider Gesteinsformationen

Interessant ist nun die Gegenüberstellung von Auflockerungsgrad und Kluftdichte resp. Kluftabstand in Figur 20. Dabei fällt zunächst auf, dass ein gesetzmässiger Zusammenhang zwischen Kluftdichte und Auflockerungsgrad vorhanden ist. Der mögliche Einfluss unterschiedlicher Oeffnungsweiten der Klüfte scheint eher untergeordnet zu sein.



Figur 20: Korrelation von Auflockerungsgrad und Kluftdichte resp. mittlerem Kluftabstand

Gebirge mit Kluftdichten < 6 , d.h. mittleren Kluftabständen von > 0.16 m konnten gemäss Figur 20 nicht mehr gerippt werden. Diese untere Grenze der Kluftabstände erscheint niedrig. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich dabei um mittlere Kluftabstände handelt. Da die Abstände im Gebirge normalerweise innerhalb gewisser Grenzen wechseln, treten meist einzelne Bänke auf, die eine grössere Mächtigkeit aufweisen, als aufgrund der mittleren Bankmächtigkeit angenommen werden könnte.

Bei dem in Figur 20 dargestellten Gebirge traten denn auch bei hohen Kluftdichten immer wieder einzelne Bänke mit einer Mächtigkeit bis zu ca. 0.30 m auf. Bei den Fällen mit Spreng-aushub dagegen wurden auch bei relativ hohen Kluftdichten einzelne Bänke mit $> 0.4 - 0.5$ m beobachtet, die dann hier wahrscheinlich die Grenze für die Reissbarkeit setzten. Es scheint uns denkbar, dass noch mächtigere Schichtpakete gerissen werden könnten; die von WEAVER (1975) und DEERE (1963) für "very hard ripping" angegebenen möglichen Bankmächtigkeiten von 0.3-1 m scheinen uns jedoch zu hoch und eher Ausnahmefälle zu beschreiben.

Im direkten Zusammenhang mit der Kluftdichte resp. dem Kluftabstand steht die Grösse und die Form des Kluftkörpers. Diese Faktoren bestimmen entscheidend auch die Grenze der Reissbarkeit.

Auf den von uns untersuchten Baustellen wurden gerissene Kluftkörpergrössen von maximal ca. 0.15 m^3 festgestellt (Länge bis 1 m, Breite bis 0.5 m, Höhe bis 0.30 m). Meist waren die Kluftkörper jedoch wesentlich kleiner. HORNUNG (1978) gibt für die Reissbarkeit eine kritische Kluftkörperabmessung mit $RD = < 0.41 \text{ RZL}$ an (RD = Raumdiagonale des Kluftkörpers, RZL = aktive Reisszahnlänge). Bei den üblichen Reisszahnängen von 1.3 - 2 m ergäbe sich damit eine obere Länge der Raumdiagonale von 0.5 - 1.2 m. Der entsprechende Kluftkörper entspricht ungefähr unseren Beobachtungen.

6.7 Zusammenhang zwischen Kluftstellung und Reissbarkeit

Fast alle untersuchten Baustellen zeichneten sich durch das Vorhandensein horizontaler oder nur schwach geneigter Trennflächen (meist Schichtflächen) aus.

Der Einfluss der Raumstellung der Trennflächen auf den Reissvorgang konnte deshalb nicht näher untersucht werden. Wir können jedoch auf die Modellversuche von HORNUNG (1978) hinweisen.

Aus diesen Versuchen und eigenen Beobachtungen ergibt sich im wesentlichen :

- horizontale oder leicht geneigte Trennflächen begünstigen den Reissvorgang
- bei leicht geneigten Trennflächen soll in Richtung des Einfallens der Trennflächen gerissen werden
- Steile Lagerung der Haupttrennflächen wirkt sich nachteilig auf den Reissvorgang aus

6.8 Maschinenabhängigkeit

Unsere Untersuchungen geben wenig Anhaltspunkte für den Zusammenhang von Maschinentyp und Reissbarkeit. Dies hätte den vergleichenden Einsatz verschiedener Maschinentypen auf den einzelnen Baustellen vorausgesetzt. Da wir aber keinen Einfluss auf die verwendeten Abbaugeräte hatten, waren solche Studien nicht möglich. Auf der andern Seite lag es nicht in unserer Absicht, die Maschinenabhängigkeit zu untersuchen. Die Gerätekriterien werden eingehend von MALETON (1973) beschrieben.

7. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die hier vorgelegte Forschungsarbeit hat einen Weg gewählt, welcher sich grundlegend von demjenigen anderer Studien unterscheidet, welche in den letzten Jahren - vor allem in Deutschland und Schweden - durchgeführt wurden. Statt dass an "Modell-Baustellen" mit grossem apparativen Aufwand die unter verschiedenen Voraussetzungen erreichbaren Abbauleistungen ermittelt wurden, konzentrierten wir unsere Beobachtungen auf "Praxis"-Baustellen. Wir konnten hier jedoch keinen Einfluss auf Gerätewahl und Abbaumethode ausüben. Diese wurden vom Unternehmer nach seiner technischen und finanziellen Beurteilung gewählt.

Dies betrachten wir jedoch keineswegs als Nachteil sondern vielmehr als gewichtigen Vorteil, weil:

- a) auf diese Weise eine grosse Anzahl von Baustellen untersucht werden konnte (ca. 65), so dass eine statistische Auswertung möglich wurde,
- b) die Untersuchungen praxisbezogen sind. Das unternehmerische Denken blieb von uns unbeeinflusst,
- c) die Abgrenzung der realen "wirtschaftlichen" Reissbarkeit (um die es uns ja schlussendlich geht) im Gegensatz zur unter Versuchsbedingungen bestimmten "effektiven" Reissbarkeit sich erübrigte und daher keine Probleme stellte.

Wir konnten somit ein breit abgestütztes Modell erarbeiten, welches uns vorallem im Hinblick auf seine Verwendbarkeit für den Praktiker als brauchbar erscheint. Die Auswertung dieser umfangreichen Studien brachte im wesentlichen folgende neue Erkenntnisse:

Die Abbaubarkeit eines Felsen wird entscheidend nur von wenigen Felsparametern bestimmt. Es sind dies:

- a) die Verbandsfestigkeit des Gesteins und
- b) das Gefüge des Gebirges

Bezüglich ihrer Abbaubarkeit können die Gesteine je nach den unter a) und b) erwähnten Eigenschaften verschiedenen Gebirgstypen zugeordnet werden (Tabelle 3, Seite 21 und Tabelle 5, Seite 58). Eine wichtige Unterteilung ergibt sich durch die Härte des Gesteins. Bei Weichgesteinen mit Druckfestigkeiten $< 400 \text{ kp/cm}^2$ bestimmen die Gesteinseigenschaften des Kleinbereichs die Abbaubarkeit je nach Verbandsfestigkeit mehr oder weniger. Diese Verbandsfestigkeit wird durch die P-Wellengeschwindigkeit des Gebirges charakterisiert.

Im Gegensatz zu den Weichgesteinen wird die Abbaubarkeit der harten - rigiden Felsarten, zu denen die meisten Gesteine zu zählen sind, allein durch die Gebirgs-Gefügeverhältnisse beeinflusst. Diese können durch den seismisch ermittelten Auflockerungsgrad und Messungen von Kluftdichte und Kluftabstand beschrieben werden.

Der grosse Vorteil in der Verwendung des Auflockerungsgrades liegt darin, dass dieser die jedem Gestein eigenen, spezifischen geophysikalischen Eigenschaften kompensiert. Eine Abbauklassierung jedes einzelnen Gesteinstyps, wie es z.B. CATERPILLAR (1966) oder DARCY (1971) vorgeschlagen hatten, ist damit nicht mehr notwendig. Unser Konzept bringt so eine Vereinfachung in dem Sinne, dass die verschiedenen Gesteinstypen aufgrund ihrer massgebenden Abbaueigenschaften in nur drei Fels-Familien (Gebirgstypen I-III) unterteilt werden. Der Geologe kann aufgrund der für diese Gebirgstypen spezifischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften jeden Gesteinstyp entsprechend klassieren.

Obschon sich unsere Studien weitgehend auf schweizerische Baustellen konzentrierten, wo die Molassegesteine eine ausgesprochen wichtige Rolle spielen, besitzt die vorgeschlagene Klassifikation eine allgemeine, nicht regional gebundene, Gültigkeit.

Das Konzept zeichnet sich durch die in der Zielsetzung geforderte Einfachheit aus. Es werden nur die für die Abbaubarkeit entscheidenden Kriterien berücksichtigt. Faktoren, welche unter Umständen am Rande eine gewisse, aber nicht massgebende Rolle spielen könnten, werden bewusst nicht einbezogen: sie würden das Konzept unnötig komplizieren.

GEIRGSTYP	I / ISOTROP - WEICH (Druckfestigkeit $\leq 400 \text{ kp/cm}^2$)	II / ANISOTROP - WEICH (Druckfestigkeit $\leq 400 \text{ kp/cm}^2$)	III / RIGID - HART/ ISOTROP - ANISOTROP
Gültigkeitsbereich	- Moräne - Nagelfluh - massive Sandsteine	- Molasse-Sandsteine und Mergel des Mittelalters - weiche Gesteine des Jura und der Alpen (Mergel u.a.)	- Kalke des Juras und der Alpen - Sandsteine der subalpinen Molasse - Flyschsandstein - harte Konglomerate und Breckzien - Granite, Gneise und andere Kristallingesteine
wichtige Gesteinsmerkmale	- hohe Gesteinsporosität und Wasseraufnahmefähigkeit - grosse Verwitterungsanfälligkeit - im allgemeinen kleine Druckfestigkeit	- hohe Gesteinsporosität und Wasseraufnahmefähigkeit - grosse Verwitterungsanfälligkeit - im allgemeinen kleine Druckfestigkeit	- geringe Wasseraufnahmefähigkeit - geringe Verwitterungsanfälligkeit - relativ hohe Druckfestigkeit - rigid
wichtige Gebirgsmerkmale	Gebirge vorwiegend isotrop	Gebirge anisotrop und inhomogen durch Wechsellagerung verschiedener Gesteine und unterschiedlich angrei- fender Verwitterung	Gebirge stark anisotrop durch Gesteinsgefüge (Schichtung und Klüftung)

ABBAUBARKEIT	SPRENGFELS	REISSBAR	BAGGERBAR	SPRENGFELS	REISSBAR	BAGGERBAR
p-Wellen- Geschwindigkeit des Gebirges V_{Geb} (m/s)	>2600	$1200 - 2600$	$<1000 - 1200$	>2800	$1000 - 2800$	<1000
Auflockerungs- grad $A = 1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$	nicht massgebend	nicht massgebend		nicht massgebend		
Klüftdichte (Anzahl Klüfte/m ²) Klüftabstand (m)	nicht massgebend	nicht massgebend		im allgemeinen nicht massgebend		
Die Abbaubarkeit erschwerende Faktoren	plastisches Verhalten des Gesteins (Furchenbildung unter dem Reisszahn)	plastisches Verhalten des Gesteins, z.B. weiche Mergel (Furchenbildung unter dem Reisszahn)		Hauptklüftung (Schichtung) steilstehend		

* Für die Zuordnung in eine Abbaubarkeit
müssen alle massgebenden Faktoren
erfüllt sein.

Tabelle 5: Klassifikation von Fels im Hinblick
auf die Abbaubarkeit.
Felskennwerte für die Prognose der Abbaubarkeit

Die gewählten Kriterien sind im Felde einfach und mit relativ geringem Aufwand zu bestimmen.

Obschon bei isotropen Gebirgen im wesentlichen die Gesteinseigenschaften die Abbaubarkeit bestimmen, ist es zweckmässig, isotrope Gebirge harter - rigider Gesteine dem Gebirgstyp III zuzuordnen. Der Grad der Gefügeanisotropie kann dabei durch den Auflockerungsgrad A beschrieben werden und wenig zerklüftete, annähernd isotrope, harte Sandsteine, harte Konglomerate und harte Granite werden sich durch ein sehr kleines A auszeichnen.

Der Gebirgstyp I (isotrop-weich) beschränkt sich daher - zumindest für die Schweizer-Verhältnisse - auf weiche Moräne, Molasse-Sandsteine und Nagelfluh (letztere ist allerdings nicht immer als weich einzustufen). Ausserhalb der Schweiz können andere weiche und isotrope Gebirge dieser Felsart zugeordnet werden, z.B. weiche Tuffe, stark verwitterte weiche Granite und andere.

Eine weitere Unterteilung der Klasse "reissbar" in "leicht reissbar" und "schwer reissbar" wäre denkbar gewesen. Wir haben auf diese recht problematische Abgrenzung verzichtet, dies umso mehr, als wir uns die Definition maschinenunabhängiger Grenzen zum Ziel gesetzt haben. Der Unternehmer wird nun die in einer Abbaubarkeitsprognose angegebenen Felskennwerte aufgrund seiner Erfahrungen für die ihm zur Verfügung stehenden Geräte interpretieren müssen.

Aus diesem Grunde haben wir es vermieden, die heute gängigen Maschinentypen in unserer Klassifikation zu berücksichtigen. Hier soll ein gewisser Spielraum für den Unternehmer offenbleiben.

Unsere Studien bestätigten, dass die P-Wellengeschwindigkeit, welche seit CHURCH (1965) und CATERPILLAR (1966) immer wieder für die Beurteilung der Abbaubarkeit verwendet wurde, nach wie vor ein brauchbares und zweckmässiges Mittel zur Gebirgserkundung im Hinblick auf unsere Zielsetzung darstellt. Dies überrascht, hatte doch MALETON (1973) diese Methode stark kritisiert und grundsätzlich in Frage gestellt.

Die P-Wellengeschwindigkeit kann aber dort nicht allein massgebend sein, wo ein vorhandenes Gesteinsgefüge den für die Abbaubarkeit massgebenden Faktor darstellt. Hier müssen zusätzliche Gefügekriterien berücksichtigt werden.

8. FOLGERUNGEN

8.1 Anforderungen an Klassen-Abgrenzungen und Vorschlag für Klasseneinteilung

Die Klassenabgrenzungen bezüglich der Abbaubarkeit sollen ein Hilfsmittel für die Baupraxis sein. Sie sollen

- dem Projektingenieur ermöglichen, ein den Baugrundverhältnissen optimal angepasstes Projekt zu entwerfen und dessen Kosten zuverlässig abzuschätzen,
- dem Unternehmer gestatten, sein Betriebskonzept optimal zu wählen und eine kostendeckende Offerte auszuarbeiten,
- den Bauleiter in die Lage versetzen, die für die Abrechnung zu unterscheidenden Materialkategorien konfliktfrei auszumessen.

Diese anspruchsvolle Funktion können die Klassengrenzen zudem nur dann erfüllen, wenn sie nicht nur materialgerecht, sondern auch durch das Baustellenpersonal überprüfbar sind. Sie müssen auf objektiven, beim Bau überprüfbaren Materialeigenschaften beruhen und sollen unabhängig von Baumethoden resp. -geräten formuliert sein.

Für die Wahl der Abgrenzungskriterien war uns daher das folgende Konzept massgebend:

Die Materialgrenze soll bestimmt sein durch

- eine messbare physikalische Kerngrösse
- eine eindeutige geologische Charakteristik

Tabelle 6, Seite 61 enthält unseren Vorschlag für die Klasseneinteilung.

TABELLE 6 : Bestimmung und Abgrenzung der Abbaubarkeitsklassen vor (Prognose) und während der Bauausführung.

ABBAUBARKEITSKLASSE		KLASSENABGRENZUNG	
gültig	neu	vor der Bauausführung	während der Bauausführung
normal baggerbar	leichter Boden	Beurteilung mit geologisch- geotechnischen Mitteln wie - Sondierungen - Schlitz - Bohrungen	Ramm-Meisselversuch (SN 670 360)
schwer baggerbar	schwerer Boden	Beurteilung mit geologisch- geophysikalischen Mitteln gemäss Tabelle 5	Beurteilung mit geologisch- geophysikalischen Mitteln sowie durch Überprüfung der Kohäsion - Sondenversuche (analog Ramm-Meissel) - Druckversuche (z.B. PLT)
reissbar ripperbar	leichter Fels	Beurteilung mit geologisch- geophysikalischen Mitteln gemäss Tabelle 5	Beurteilung mit geologisch- geophysikalischen Mitteln sowie durch Überprüfung der Kohäsion - Sondenversuche (analog Ramm-Meissel) - Druckversuche (z.B. PLT)
Sprengfels	schwerer Fels		

Grundlagen resp. Normen vorhanden



Grundlagen durch ergänzende Forschungen zu ermitteln

8.2 Vergleich mit vorhandenen Normen

Mit den uns bekannten heute gebräuchlichen Normen könnten die neuen Klassen wie folgt korreliert werden:

Tabelle 7 : Korrelation der heute gebräuchlichen schweizerischen und deutschen Normen mit neuem Vorschlag für die Klasseneinteilung

SCHWEIZ NEU	SCHWEIZ VSS NPK	BR DEUTSCHLAND ZTVB - STB 65
Leichter Boden	normal baggerbar	wasserhaltender Boden leichter Boden mittelschwerer Boden
Schwerer Boden	schwer baggerbar	bindiger mittel- schwerer Boden schwerer Boden
Leichter Fels	ripperbar	leichter Fels
Schwerer Fels	Sprengfels	schwerer Fels

9. AUSBLICK

Auf der Grundlage der vorliegenden Forschungsergebnisse sowie früherer Untersuchungen ist es nun möglich, maschinenunabhängige Abbaubarkeitsklassen zu definieren. Ihre gegenseitigen Abgrenzungen können gemäss Tabellen 5 und 6, Seiten 58 und 61 ermittelt resp. nachgewiesen werden.

Die noch fehlenden Kriterien zur Klassenabgrenzung während der Bauausführung sollten, wenn möglich, ohne Verzug erarbeitet werden, da ohne sie die nun vorhandenen Kriterien für die Projektphase (vor der Bauausführung) nur einen begrenzten Wert haben.

Es kann jedoch aufgrund der bisherigen Grundlagen gesagt werden, dass entsprechende praxisnahe Versuchsverfahren gefunden werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

- BADER, H. (1967): Geophysikalisches Verfahren und herkömmliche Baugrunduntersuchungen im Strassenbau. Strasse und Autobahn, Heft 5
- BRUEGGEMANN, K. und FAUST, J. (1970): Anwendung der Seismik bei der Boden-erkennung im Strassenbau
- CATERPILLAR Tractor Co. (1966): Handbook of ripping
- CHURCH, H.K. (1965): Seismic Exploration Yields Data on Excavation Costs and Methods. Eng.News-Record 175
- CHURCH, H.K. (1972): 433 Seismic Excavation Studies: What They Tell about Rippability Roads and Streets
- DARCY, J. (1971): Application de la mécanique des roches aux terrassements rocheux. Bulltin de Liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussées, no 50, Jan. - Fev.
- DERRE, D.U. (1963): Technical descriptions of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik and Ingenieurgeologie, Vol. 1, No. 1
- DEERE, D.U. (1968): Geological considerations. Rock mechanics in Engineering practice. Ed.K.G.Stagg and O.C.Zienkiewicz,J.Wiley, New York,
- DE QUERVAIN, F.(1967): Technische Gesteinskunde. Birkhäuser Verlag
- DE QUERVAIN, F.(1969): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Verlag Kümmerli + Frei, Bern
- GASSMANN, F. und WEBER, M. (1960): Einführung in die angewandte Geophysik. Verlag Hallwag, Bern. 284 Seiten
- GSCHWIND, M. and NIGGLI, P. (1931): Untersuchungen über die Gesteinsverwitterung in der Schweiz. Beitr. Geologie der Schweiz, Geotechn. Serie, XVII Lfg.
- GUTHEIL, F. (1970): Zu den ingenieurgeologischen Grundlagen des maschinellen Felsreissens. N. Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte

LITERATURVERZEICHNIS (Fortsetzung)

- HAALCK, H.C. (1958): Lehrbuch der angewandten Geophysik, Band 2. Gebrüder Bornträger, Berlin - Nikolasssee, 328 Seiten
- HAGEDOORN, J.G.(1959): The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. Geophysical Prospecting, vol. 7, p. 158 - 182
- HORNUNG, J. (1975): Die maschinelle Reissbarkeit von Fels - ein technisches oder ein wirtschaftliches Problem. Baumaschine und Bautechnik, Heft 10
- HORNUNG, J. (1978): Geometrisch bedingte Einflüsse auf den Vorgang des maschinellen Reissens von Fels - untersucht an Modellen. Veröff. des Inst. f. Maschinenwesen der Universität Karlsruhe. Reihe F, Heft 18
- KIEKENAP, B. (1972): Wirtschaftliche Verarbeitung von Felsgestein. Baumaschine und Bautechnik, Heft 5
- MALETON, G. (1972): Beitrag zur Problematik der Reissbarkeit von Fels. Baumaschine und Bautechnik 6
- MALETON, G. (1973): Wechselwirkungen von Maschine und Fels beim Reissvorgang. Veröff. d. Inst. für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe, Reihe F/Heft 5
- MUELLER, L. (1963): Der Felsbau. Ferd. Enke Verlag, Stuttgart
- MUSGRAVE, A.W.(1967): Seismic refraction prospecting. Soc. of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla., USA. 604 Seiten
- NICHIMATSU, Y.(1972): The Mechanics of Rock Cutting. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 9
- NUR, A. und
SIMMONS, G. (1969): The Effect of Saturation on Velocity in low porosity Rocks. Earth and Planetary Science Letters 7, 183 - 193
- PALMER, D. (1980): The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation. Soc. of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla., USA. 104 Seiten

LITERATURVERZEICHNIS (Fortsetzung)

- PANET, M. (1974): Les terrassements rocheux dans les travaux routiers et autoroutiers. La technique routiere, vol. XIX
- RITTNER, H. (1971): Klassifikation der Bodenarten aus gewinnungstechnischer Sicht. Der Tiefbau
- SCHENK, V. und
SCHENKOVA, Z. (1974): Stress wave velocity and crack system of a medium. Geophys.prosp. 22
- UGEN, V. (1967): Résultats d'essais géosismiques en vue de la reconnaissance des sols et du bed rock à faible profondeur. Eng. Geology, 2
- WAKATSUKI, M. et al. (1972): Application of Field and Laboratory Tests to Cutting Works. Japan Road Assoc. Annual rep. of Roads
- WEAVER, J.M. (1975): Geological Factors significant in the Assessment of Rippability. Die Siviele Ingenieur, Suid-Afrika
- WYLLIE' M.R.J.,
GREGORY, A.R. and
GARDNER, L.W. (1956): Elastic wave velocities in heterogenous and porous media. Geophysics, 21 1
- ZEINDLER, H. und
BORKOVEC, M. (1972): Der Ramm-Meisselversuch. Strasse + Verkehr, 1
- ZEINDLER, H./SCHELLER, E./
KEUSEN, H.R. und
BRECHBUEHLER, H. Geophysikalische Vorausbestimmung der Aufreissbarkeit von Felsgesteinen
1. Zwischenbericht 1972
2. Zwischenbericht 1976
Kommission für Strassenbauforschung des EDI Vereinigung Schweizerischer Strassenfachmänner

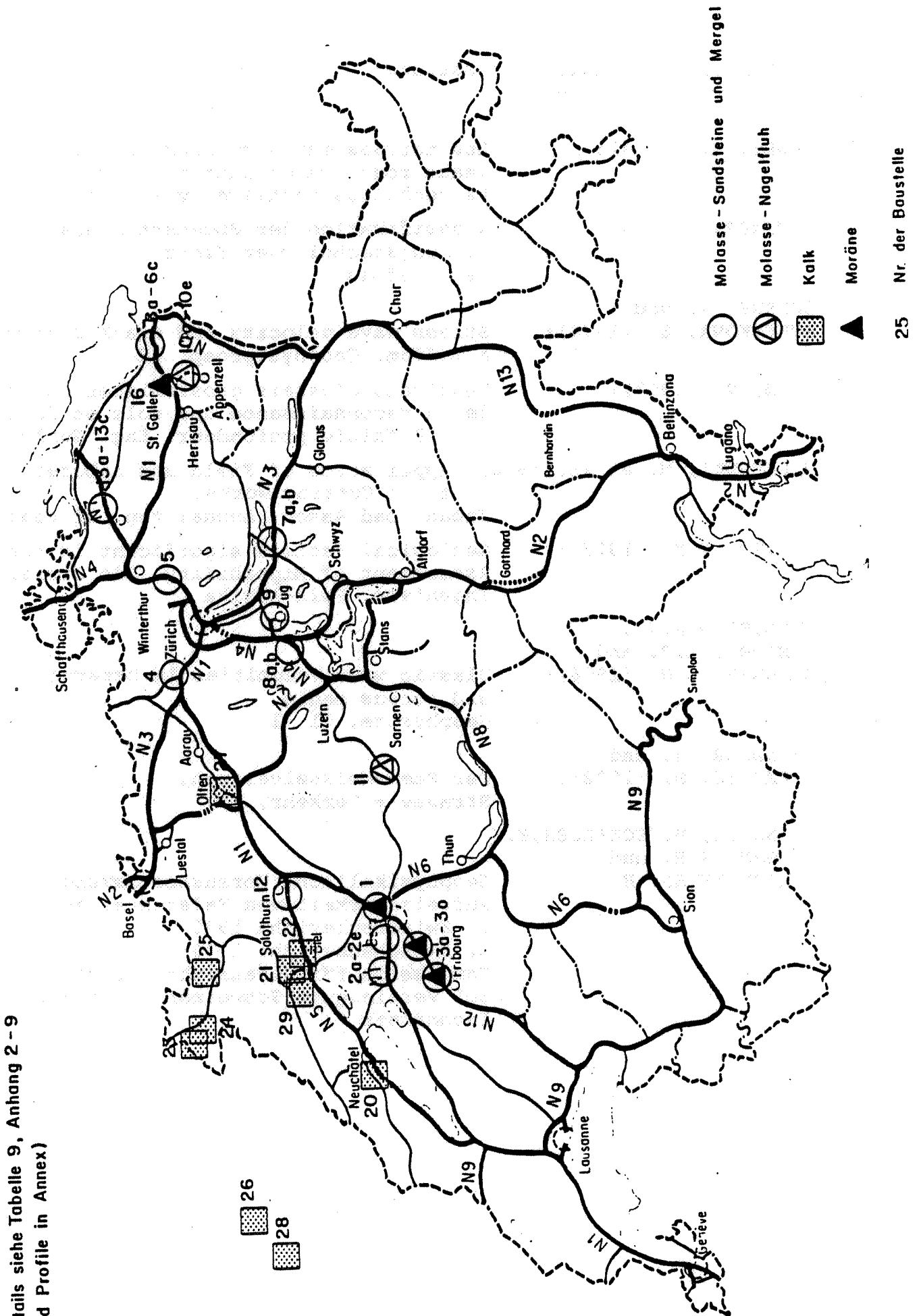


Tabelle 9
 Untersuchte Baustellen: Geologie, Geophysik und Bauerfahrung
 MOLASSE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS= Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
1	SN 1 Bern Zubringer Neufeld	Untere Süswasser- molasse (Sandsteine + Mergel)	OS 110 m well shooting	1000 - 3800 m/s	keine Bauerfahrung
2	N1 Bern - Vevey				
2a	Einschnitt Gäbelbach		OS 110 m	2000 - 2700 m/s	ripperbar
2b	Einschnitt Frauenkappelen		OS 220 m	1800 - 2600 m/s	ripperbar
2c	Einschnitt Teuftal E	Untere Süswassermolasse (vorwiegend Sand- steine)	OS 330 m	1700 - 2500 m/s	ripperbar D9
2d	Einschnitt Teuftal W		OS 110 m	1700 - 2000 m/s	ripperbar D9
2e	Einschnitt Saane West		OS 220 m	1900 - 2300 m/s	ripperbar D9
3	N12 Bern - Fribourg				
3a	km 65800	Obere Meeresmolasse	OS 110 m	2400 m/s	ripperbar D8
3b	km 63100	Obere Meeresmolasse		?	ripperbar D9
4	N1 Neue Furtalstrasse Einschnitt Pfaffenbiel	Obere Süswasser- molasse/vorwiegend Sandsteine mit Störungszonen	OS 180 m	1800 m/s	ripperbar mit D9
5	N1 Zürich - Winterthur Einschnitt Lampberg	Mergel und Sandsteine der oberen Süswasser- molasse	OS 110 m	2400 - 2500 m/s	ripperbar mit D8

Tabelle 9 : Fortsetzung

MOLASSE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS= Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
6	N1 Rorschacherberg (SG)	Obere Meeresmolasse	OS 220 m	3500 - 3700 m/s	Sprengfels
6a	Einschnitt Linkolnsberg	flach einfallende Sandsteine,	OS 55 m	400 - 800 m/s	baggerbar
6b	Einschnitt Oberdorf	wenig Mergel		2900 - 3100 m/s	Sprengfels
6c	Einschnitt Mittlerer Buchberg		OS 220 m	500 - 1000 m/s	baggerbar
				2900 - 3100 m/s	Sprengfels
7	N3 Pfäffikon - Lachen	Untere Süßwasser-molasse	OS 110 m	1000 - 1.00 m/s	ripperbar
7a	Einschnitt Lidwil	Sandsteine und Mergel		3200	Sprengfels
7b	Einschnitt Chessibach	horizontal gebankt	OS 220 m	1000 - 1200 m/s	ripperbar
				3000 - 3300 m/s	Sprengfels
8	N4 (ZG)	Obere Süßwasser-molasse	OS 170 m	2600 - 3000 m/s	teilweise ripperbar, vorwiegend Sprengfels
8a	Einschnitt Eret km 6.5	Sandsteine und Mergel,			
8b	Einschnitt Knodenwald km 7.5	horizontal gebankt	OS 170 m	3400 - 3600 m/s	Sprengfels
9	T4 (ZG)	Obere Süßwasser-molasse	OS 65 m	2300 - 2400 m/s	vorwiegend ripperbar mit D9/ lokal Sprengfels
	Einschnitt Frueberg	Sandsteine und Mergel horizontal gebankt			

Tabelle 9 : Fortsetzung

MOLASSE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS= Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
10	T 150 (AR) Lustmühle				
10a	Profil 8	"Obere Nagelfluh"	OS 110 m	2600 m/s	Sprengfels
10b	Profil 5	"Obere Nagelfluh"	OS 110 m	2500 m/s	Sprengfels
10c	Profil 17	"Untere Nagelfluh"	OS 110 m	3400 m/s	Sprengfels
10d	Profil 11	"Untere Nagelfluh"	OS 110 m	2800 - 2900 m/s	Sprengfels
10e	Profil 17	Mergel	OS 110 m	2000 m/s	ripperbar
11	Trubschachen	Nagelfluh (Napfschuttfächer)	OS 300 m	3600 - 4600 m/s	Sprengfels
12	N5 (So) Birchi-Bleichenberg	Untere Süßwasser- molasse (Sandsteine u. Mergel)	OS 400 m well shooting	1000 - 2700 m/s	keine Bauerfahrung
13a	N7 (TG)	Moräne über	OS 1400 m	1600 - 2000 m/s	keine Bauerfahrung
13b	Einschnitt	Oberer Süßwasser- molasse		2500 - 2900 m/s	
13c	Berg				

Tabelle 9 : Fortsetzung

MORAENE

Januar 1982

Anhang 5

GEOTEST

67063

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS= Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
1	SN 1 Bern Zubringer Neufeld	Moräne über Molasse	OS 110 m	1600 m/s	ripperbar mit D7
3	N12 Bern - Fribourg	Grundmoräne Moräne, verkittet, teilweise kompakt, hart	OS 110 m	1600 m/s	ripperbar mit D7
3c	km 67 200		OS 110 m	1600 - 1900 m/s	ripperbar mit D7
3d	km 66 800		OS 110 m	1300 - 1500 m/s	baggerbar
3e	km 65 900		OS 110 m	2400 - 2500 m/s	ripperbar
3f	km 65 700		OS 110 m	2400 - 2500 m/s	ripperbar
3g	km 64 800		OS 110 m	2400 - 2600 m/s	ripperbar
3h	km 64 600		OS 110 m	600 m/s	baggerbar
3i	km 64 400		OS 160 m	1200 - 1500 m/s	baggerbar
3k	km 63 700		OS 110 m	2300 - 2500 m/s	ripperbar mit D9
3l	km 63 200		OS 110 m	300 m/s	baggerbar
3m	km 61 200		OS 110 m	1700 - 2000 m/s	ripperbar mit D8
3n	km 61 000		OS 110 m	2300 m/s	
3o	km 60 900		OS 110 m		
16	Stephanshorn	Moräne	OS 480 m well shooting in Bohrungen	1700 - 1800 m/s	schwer baggerbar mit RH 12 (Abbau erleichtert durch lokale Wassereintritte)

Tabelle 9 : Fortsetzung

MORAENE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS= Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
2a	N1 Einschnitt Gäbelbach	Moräne	OS 110 m	1400 - 1800 m/s	baggerbar
2c	N1 Einschnitt Teuftal E		OS 330 m	900 - 1200 m/s	baggerbar

Tabelle 9 : Fortsetzung

KALKE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS= Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauverfahren
20	Serrieres	großgebankte Kreidekalke horizontal gebankt bis leicht geneigt	OS 180 m	3600 - 4000 m/s	Sprengfels
21	Maggingen/Sporthalle	Malmkalke ca. 100 geneigt	OS 550 m	1700 - 2300 m/s	Sprengfels
22	Biel/Wildermeth	Kalke des Malm und der Kreide 20-250 einfallen	OS 500 m	1500 - 1800 m/s 2300 - 2600 m/s	ripperbar Sprengfels
23	Le Paradies	Malmkalke leicht (10-150) einfallende Malmkalke	OS 165 m	1900 - 2500 m/s 2800 - 3300 m/s	ripperbar Sprengfels
24	Mormont	Malmkalke horizontal gebankt	OS 185 m	3900 - 4100 m/s	Sprengfels
25	Les Ordon	Kalke und Mergel des Dogger 15-200 einfallend	OS 180 m	2200 - 2500 m/s	ripperbar Sprengfels

Tabelle 9 : Fortsetzung

KALKE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS = Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
26	A 36	Kalke des Malm und Dogger	OS 400 m	800 - 1700 m/s 2000 - 3600 m/s	ripperbar Sprengfels
			OS 300 m	1900 - 4800 m/s	Sprengfels
			OS 150 m	1000 m/s 2600 - 4500 m/s	ripperbar Sprengfels
			OS 500 m	800 - 1800 m/s 2100 - 3700 m/s	ripperbar Sprengfels
			OS 250 m	2400 - 4700 m/s	Sprengfels
			OS 250 m	900 - 1000 m/s 2100 - 3700 m/s	ripperbar Sprengfels
			OS 250 m	2100 - 5000 m/s	Sprengfels
			OS 110 m	2100 - 2600 m/s	Sprengfels
			OS 220 m	2000 - 2600 m/s	Sprengfels
			OS 440 m	1000 m/s 2600 - 2800 m/s 1200 m/s 2750 m/s	ripperbar Sprengfels ripperbar Sprengfels
27	Olten a) Profil 12 b) Profil 14	Kalke und Kalkmergel des Malm, horizontal gebankt			
28	A 36 km 1325	Kalke des Malm und Dogger	OS 1200 m	700 - 1000 m/s 2500 - 4800 m/s	ripperbar Sprengfels
	1438			750 - 1500 m/s 2500 - 2700 m/s	ripperbar Sprengfels
	1580			900 - 1350 m/s 2450 - 2950 m/s	ripperbar

KALKE

No.	Baustelle	Geologie	Ausgeführte seismische Messungen OS = Oberflächen-seismik	gemessene seismische Geschwindigkeit	Bauerfahrung
29	Magglingen	Kalke des Malm, ca. 20-25° geneigt	OS 300 m Well-shooting		keine Bauerfahrung

Tabelle 10: P-Wellengeschwindigkeiten V_{Geb} und V_{Gest} und Kluftdichte der untersuchten Kalke

No.	V_{Geb}	V_{Gest}	$1 - \frac{V_{Geb}}{V_{Gest}}$	Kluftdichte	Bauerfahrung
20	3600 - 4000	4100	0.13 - 0.03	1 - 3	Sprengfels
21	1700 - 2300 3100 - 3600	5200	0.68 - 0.56 0.41 - 0.31	10 - 12 3 - 5	ripperbar Sprengfels
22	1500 - 1800 2300 - 2600	3300 3900	0.55 - 0.46 0.42 - 0.36	12 - 14 4 - 5	ripperbar Sprengfels
23	1900 - 2500 2800 - 3300	4700 5000	0.60 - 0.47 0.44 - 0.34	8 - 12 2 - 3	ripperbar Sprengfels
24	3900 - 4100	4150	0.07 - 0.02	2 - 4	Sprengfels
25	1700 - 2200 2500	4400	0.62 - 0.50 0.44	8 - 15 3 - 4	ripperbar Sprengfels
26a	1100 2000 - 2800	3900 4100	0.72 0.52 - 0.32	15 - 20 4 - 5	ripperbar Sprengfels
26b	1900 - 4800				
26c	1000 2600 - 4500	5100	0.81 0.49 - 0.12		ripperbar Sprengfels
26d	800 - 1800 2100 - 2800	3800	0.79 - 0.53 0.45 - 0.27	8 - 12 2	ripperbar Sprengfels
26e	2400 - 4700	5200	0.54 - 0.10		Sprengfels
26f	900 - 1000 2100 - 3700	3900	0.77 - 0.74 0.46 - 0.05		ripperbar Sprengfels
26g	2100 - 5000	5200	0.60 - 0.04		Sprengfels
26h	2100 - 2600	3700	0.44 - 0.30		Sprengfels
26i	2000 - 2600	3900	0.49 - 0.34		Sprengfels

Tabelle 10: P-Wellengeschwindigkeiten V_{Geb} und V_{Gest} und
Kluftdichte der untersuchten Kalke
(Fortsetzung)

No.	V_{Geb}	V_{Gest}	$1 - \frac{V_{\text{Geb}}}{V_{\text{Gest}}}$	Kluftdichte	Bauerfahrung
27a	1000 2600 - 2800	3800 4100	0.74 0.37 - 0.32	5 - 10 2 - 4	ripperbar Sprengfels
27b	1200 2750	3900 4200	0.70 0.35	5 - 10 2 - 5	ripperbar Sprengfels
28a	700 - 1000 2500 - 4800	4700 5100	0.86 - 0.79 0.51 - 0.06		ripperbar Sprengfels
27b	750 - 1500 2500 - 2700	4100 4200	0.82 - 0.64 0.41 - 0.36		ripperbar Sprengfels
27c	900 - 1350 2450 - 2950	4700	0.81 - 0.72 0.48 - 0.38		ripperbar Sprengfels