

5. Vorbereitung und Durchführung von Stimulationen

Die Auswahl der Stimulationsmethode und die Vorbereitung der Arbeiten erfolgen grundsätzlich mit den geologischen und technologischen Bereichen des jeweiligen Auftraggebers, wobei folgende Faktoren zur Entscheidungsfindung herangezogen werden:

- Zielstellung der geplanten Stimulationsarbeiten
- geologisch-lagerstättenkundliche Parameter, wie mineralogische Zusammensetzung des Speichergesteines, Klüftigkeit, Porosität, Permeabilität, Schichtinhalt, Ergebnisse bohrlochgeophysikalischer Messungen, Schichtdruck, Abbauzustand der Lagerstätte, Interpretationen von Druckaufbaumessungen oder Testergebnissen, Fördercharakteristika, Schichttemperatur, Ergebnisse bereits durchgeführter Stimulationen
- technische Parameter der Sonde, wie unter- und übertägige Installation (Verrohrung, Zementation, Perforation, Be-

handlungsstrang, Sondenkopfausrüstung, Behältervolumen), mögliche Schädigung des Speichers während des bohrtechnischen Aufschlusses

- technische Ausrüstungen zur Durchführung der Stimulation, wie Pumpfahrzeuge, Sandmischer, Zisternen, Zupumpeinheiten, Saugsystem, Drucksystem, spezielle Sondenkopfausrüstungen, spezielle untertägige Ausrüstungen, wie Packergarnituren, weitere Komplettierungselemente, Meßeinrichtungen

5.1. Ausrüstungen zur Durchführung von Stimulationen

Infolge der hohen Arbeitsdrücke und hohen Injektionsraten, Zugabe von Feststoffen und Chemikalien zur Behandlungsflüssigkeit während der Injektion und der Verwendung mehr oder weniger konzentrierter Säuren und Laugen sind spezielle Über- und untertägige Ausrüstungen erforderlich.

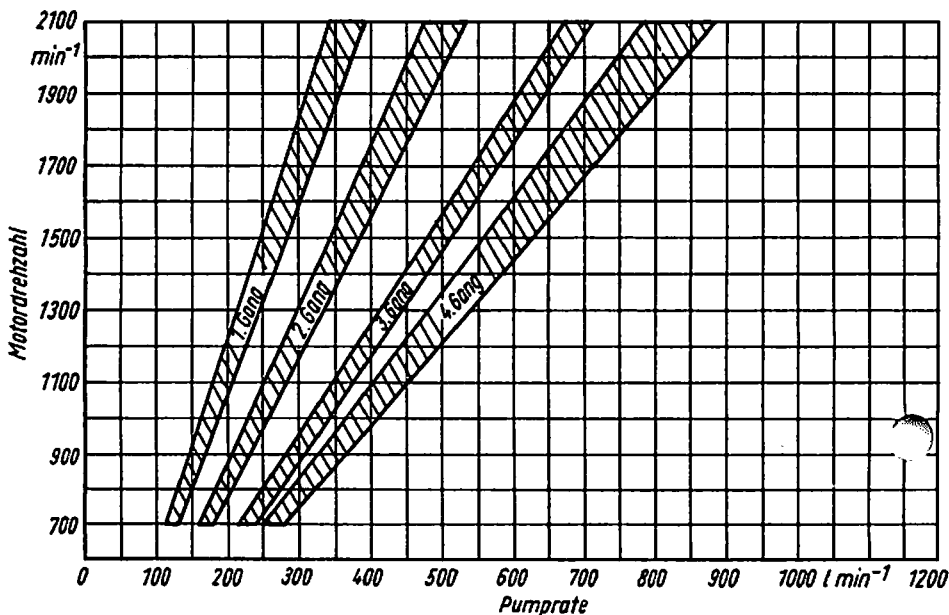


Bild 30. Leistungsparameter des Pumpfahrzeuges 4 AN-700

- a) Kolbendurchmesser: 100 mm
 Kolbenhub: 200 mm
 Wirkungsgrad: 0,8 bis 0,9
 Druckstufen: 1. Gang: 719 at, 2. Gang: 529 at,
 3. Gang: 374 at, 4. Gang: 298 at

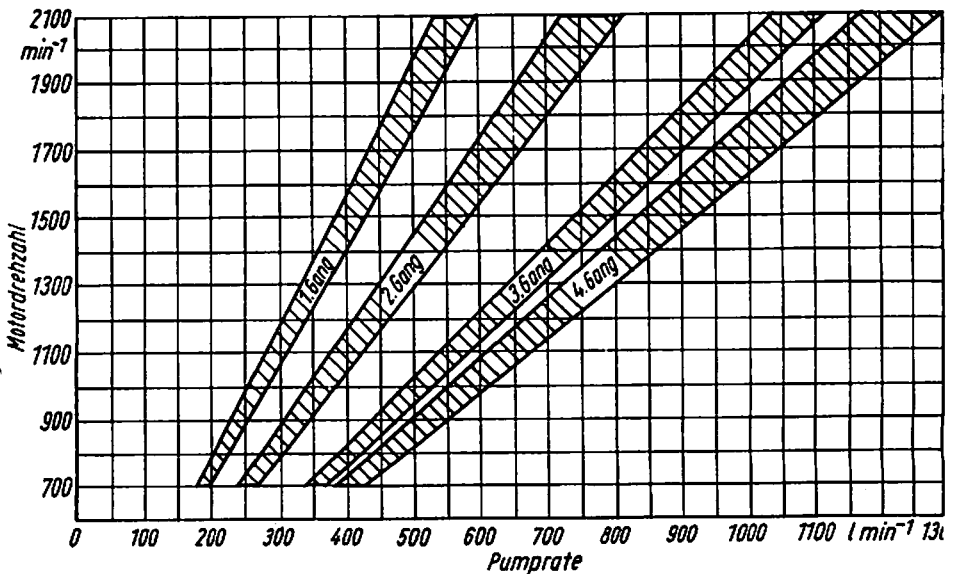
5.1.1. Obertägige Ausrüstungen

5.1.1.1. Pumpfahrzeuge

Die mobilen Pumpfahrzeuge, auch Fracaggregate genannt, bestehen grundsätzlich aus folgenden Baugruppen:

- einfachwirkende Triplexpumpe mit Druck- und Saugsystem
- Reduktionsgetriebe für mehrere Gänge sowie einer Frictionskupplung
- Antriebsmotor für die Triplexpumpe (Dieselmotor oder Turbine)
- Fahrzeug

In Tabelle 7 sind die international am häufigsten verwendeten Pumpfahrzeuge aufgeführt.



- b) Kolbendurchmesser: 120 mm
Kolbenhub: 200 mm
Wirkungsgrad: 0,8 bis 0,9
Druckstufen: 1. Gang: 500 at, 2. Gang: 366 at
3. Gang: 260 at, 4. Gang: 207 at

Tabelle 7. Pumpfahrzeuge

Bezeichnung	Maximaler Arbeits- druck in at	Pumprate bei maximalem Arbeitsdruck in $l \text{ min}^{-1}$	Hydraulische Leistung in HPS
Twin HT-400, Modell 58-F (USA)	1400	250	1000
Turbo-Jet- Pumper, Modell B 902 (USA)	1055	300	825...850
ACF-1050 (SR Rumänien)	1050	180	450
4 AN-700 (UdSSR)	710	250	470
ACF-700 (SR Rumänien)	700	200	450

Die Leistungsdaten des Pumpfahrzeuges 4 AN-700 sind im Bild 30 dargestellt.

5.1.1.2. Sandmischfahrzeuge

Die Sandmischfahrzeuge dienen zum Transport von Feststoffpartikeln (Stützmaterial, Abrasivmaterial) sowie der Zugabe die Medien zur Behandlungsflüssigkeit. Der Mischvorgang erfolgt in einem Trommelbehälter mit Rührwerk. Über eine Schnecke, deren Drehzahl regelbar ist, werden die Feststoffpartikel der Behandlungsflüssigkeit zudosiert (Regelbereich 30 bis 1000 kg min^{-1}). Vom Mischbehälter wird die mit Feststoffpartikeln versetzte Behandlungsflüssigkeit den Fracaggregaten zugepumpt.

5.1.1.3. Zisternen

Zisternen werden bei Stimulationsarbeiten zum Transport der Behandlungsflüssigkeiten (Salzsäure, Essigsäure, Tenside, Wasser usw.) benötigt. Das Bunkervolumen beträgt 9 bis 17 m³. Bei den Säurezisternen sind die Behälter mit einem säureresistenten Material ausgekleidet. Die Zisternen sind mit einer Triplexpumpe bzw. Kreiselpumpe komplettiert, mit der ein Befüllen und Entleeren des Behälters möglich ist.

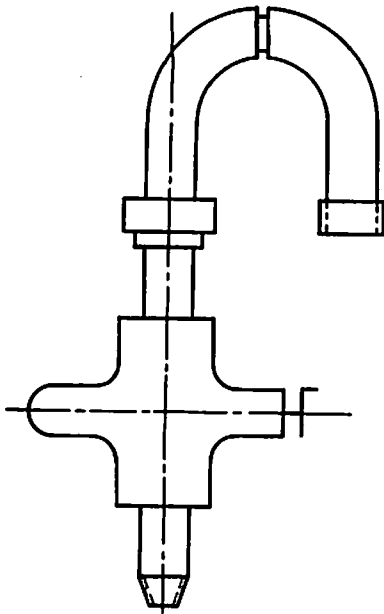
5.1.1.4. Druckmanifold

Als Druckleitungen kommen 2"-Hochdruckstangen mit Schnellkupplungsanschlüssen und entsprechendem Zubehör, wie Hochdruckknie, Hochdruckverteilerstück (Y- oder T-Stück), Hochdruckkükten mit einem zulässigen Arbeitsdruck von 700 kp cm⁻² zum Einsatz. Die Hochdruckleitungen der einzelnen Pumpfahrzeuge können in einem mobilen Druckmanifold, das mit einem Rückschlagblock (Rückschlagventil für jedes Pumpfahrzeug), mit Hochdruckschiebern mit Meßstellen für den Steigraumdruck sowie Entlastungsmöglichkeiten ausgerüstet ist, zusammengefaßt werden. Von diesem Manifold können zwei Hochdruckleitungen zum Steigraum und zwei Hochdruckleitungen zum Ringraum verlegt werden. Es wird angestrebt, nicht mehr als 1,6 m³ min⁻¹ durch eine 2"-Hochdruckleitung zu pumpen, da bei höheren Pumpraten die Erosionsauswirkungen zu groß sind. Durch Umstellen der Schieber können verschiedene Pumprichtungen realisiert werden, z. B. Injektion im Steigraum oder im Ringraum.

5.1.1.5. Sondenkopfausrüstung

Für Erosionsperforationen, Säurebehandlungen mit Packer und Fracbehandlungen mit Packer sind spezielle Sondenkopfausrüstungen erforderlich.

Die genannten Varianten sind in den Bildern 31 und 32 dargestellt. Es ist besonders darauf zu achten, daß eine ausreichende Bügelfreiheit zwischen Elevator und Kloben vorhanden ist, damit der Behandlungsstrang bewegt werden kann.



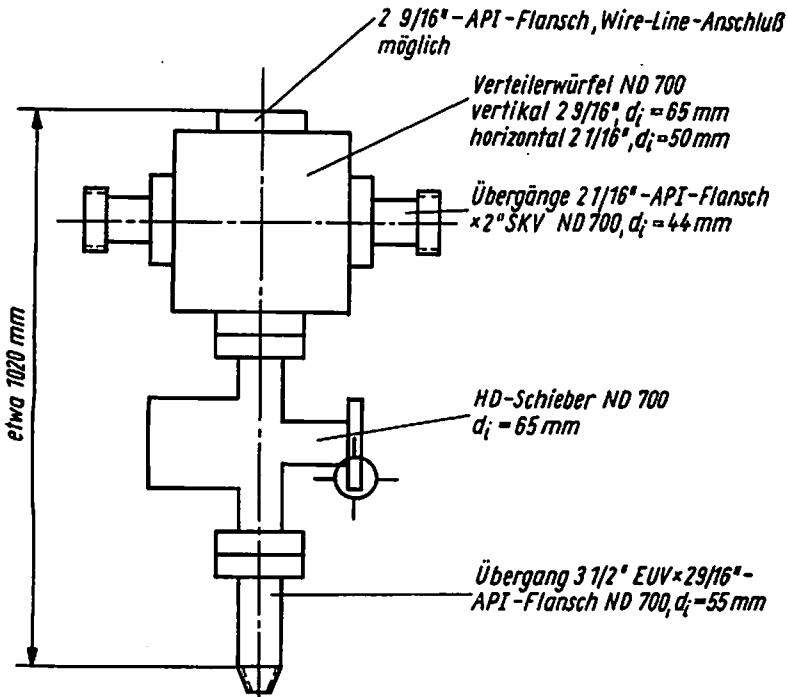
HD-Knie, ND 700, $d_i = 44 \text{ mm}$

Übergang HD-Schieber $\times 2^\circ \text{SKV}$,
ND 700, $d_i = 40 \text{ mm}$

HD-Schieber, ND 700
 $d_i = 50 \text{ mm}$

Übergang $2 \ 7/8^\circ \text{EUV} \times \text{HD-Schieber}$,
ND 700, $d_i = 44 \text{ mm}$

Bild 31
Mögliche Sondenkopfausrüstung für eine Erosionsperforation oder eine Säurebehandlung mit Behandlungspacker



$2 \ 9/16^\circ \text{-API-Flansch, Wire-Line-Anschluß}$
möglich

Verteilerwürfel ND 700
vertikal $2 \ 9/16^\circ$, $d_i = 65 \text{ mm}$
horizontal $2 \ 1/16^\circ$, $d_i = 50 \text{ mm}$

Übergänge $2 \ 1/16^\circ \text{-API-Flansch}$
 $\times 2^\circ \text{SKV}$ ND 700, $d_i = 44 \text{ mm}$

HD-Schieber ND 700
 $d_i = 65 \text{ mm}$

Übergang $3 \ 1/2^\circ \text{EUV} \times 2 \ 9/16^\circ \text{-API-Flansch}$
ND 700, $d_i = 55 \text{ mm}$

etwa 1020 mm

Bild 32
Mögliche Sondenkopfausrüstung für eine Fracbehandlung

5.1.1.6. Zupumpeinheiten

Als Zupumpeinheiten dienen eine oder mehrere Kreiselpumpen mit einer maximalen Fördermenge von $2,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. Saugseitig werden die Kreiselpumpen mittels 5"-Saugschläuchen mit Schnellkupplungsanschlüssen an die Behälterbatterie angeschlossen. Verbindungselemente zwischen Kreiselpumpen und Sandmischfahrzeugen sind 4"-Saugschläuche mit Schnellkupplungsanschlüssen. Als Verbindungselemente zwischen Sandmischfahrzeugen und Saugkollektor der Pumpfahrzeuge dienen ebenfalls 4"-Saugschläuche mit Schnellkupplungsanschlüssen.

5.1.1.7. Meßleitstand

Im Meßleitstand werden folgende Injektionsparameter erfaßt und aufgezeichnet:

- Druck Steigraum in kp cm^{-2}
- Druck Ringraum in kp cm^{-2}
- Injektionsrate in $\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$
- Sandzugabe eines jeden Sandmischfahrzeuges in kg min^{-1}

Sämtliche Pumpfahrzeuge und Sandmischaggregate sind über eine Sprechanlage mit dem Meßleitstand verbunden. Das Einfahren der Pumpfahrzeuge und der Sandmischaggregate sowie das Einstellen des endgültigen Injektionsregimes erfolgen auf Anweisung des Leiters der Behandlung vom Meßleitstand.

5.1.1.8. Ausrüstung der Test- bzw. Bohranlage

Von den jeweiligen Test- bzw. Bohranlagen sind gemäß Projekt bereitzustellen:

- Behandlungsstrang
- Behälterbatterie für die Behandlungsflüssigkeiten, verbunden durch ein 10"-Saugmanifold, komplettiert mit 5"-Schnellkupplungsanschlüssen. Jeder Behälter muß abgeschiebert werden können, sie müssen sauber und dicht sein. Unsauberkeiten können dazu führen, daß die Behandlungsflüssigkeiten, wie Gele,

Emulsionen, vorzeitig zerstört werden. Geringe Undichtheiten werden bei der Bevorratung von Säuren stark angegriffen, so daß es zum Auslaufen der Säure und zur Umweltverschmutzung kommen kann.

- Behälter mit Totpumpflüssigkeiten
- Entlastungsmanifold
- Separator mit Fackeln und Meßeinrichtungen
- E-Anschluß für Kreiselpumpen und Meßleitstand (Lichtstromaggregat bzw. Trafostation).

5.1.2. Untertägige Ausrüstungen

Zu den untertägigen Ausrüstungen gehören alle Elemente, die zum Zwecke der Stimulation in das Bohrloch eingebracht werden. Im einzelnen werden dazu gezählt:

- der Behandlungsstrang mit den Übergangselementen (Dimensionsübergänge)
- Erosionsperforatoren, Behandlungspacker sowie spezielle Komplettierungselemente

Grundsätzlich sind stimulationsspezifische untertägige Ausrüstungen erforderlich.

- Perforatoren der verschiedenen Konstruktionen sowie Fensterstücke bei Erosionsperforationen
- Behandlungspacker sowie spezielle Komplettierungselemente bei Fracbehandlungen
- Behandlungspacker und spezielle Komplettierungselemente bei Formationswaschungen und Säurebehandlungen, wenn der zu erwartende Kopfdruck bei der Injektion den zulässigen Innendruck der Rohrtour überschreitet oder wenn eine schnellere technische Freiförderung über Packer und Behandlungsstrang angestrebt wird

5.1.2.1. Behandlungspacker

Der Zweck der bei Stimulationen benutzten lösbaren Packer läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die hohen Behandlungsdrücke in größeren Teufen wirken sich nicht auf die gesamte Endverrohrung, deren Innendruckfestigkeit kleiner als die eines Steigrohrstranges ist, aus. Des weiteren erfolgt keine Beschädigung des Zementmantels infolge Innendruckbelastung der Endverrohrung.
- Chemisch und mechanisch korrosive Flüssigkeiten wirken nicht auf die Endverrohrung.

• Mit Hilfe speziell zusammengestellter Behandlungsgarnituren (Straddle-Garnitur) können selektive Stimulationen (Behandlung eines ausgewählten Horizontes) durchgeführt werden.

Als Behandlungspacker können folgende Typen eingesetzt werden:

- Schlipspacker Psch-500 und hydraulischer Packer PG-500 in Verbindung mit speziellen Anker (UdSSR)
 - zulässiger Differenzdruck am Packer: 500 kp cm^{-2}
 - maximale Bohrlochsohlentemperatur: $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Setzmechanismus: mechanisch, hydraulisch
 - Setzvorgang: $1/4$ Umdrehung links und Entlastung des Behandlungsstranges um etwa 7 Mp
 - Lösen: Anziehen auf Normallast
 - Wirkung des Ankers: hydraulisch
 - Bewertung des Packers: in geringen Teufen anwendbar, relativ robust
- technische Daten dieses Packertyps: siehe Tabelle 8
- HRP-1-Packer (hydraulic set, retrievable Packer, USA)
 - zulässiger Differenzdruck am Packer: 700 kp cm^{-2}
 - maximale Bohrlochsohlentemperatur: $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Setzmechanismus: hydraulisch
 - Setzvorgang: Einwerfen einer Setzkugel und Abscheren des Kugelsitzes in der Setzvorrichtung mit einem Differenzdruck zwischen Steig- und Ringraum von 280 kp cm^{-2}

Tabelle 8. Technische Daten der SU-Behandlungspacker

Bezeichnung des Packers	Abmessung der Futter- rohre	Wanddicke der Futter- rohre	Innendurch- messer der Futterrohre	Außen- durch- messer des Pak- kers	Innen- durch- messer des Packers	Länge des Packers	Anschluß Kopf	Anschluß Fuß	Bemerkungen
	in Zoll	in mm	in mm	in mm	in mm	in mm			
Schlipspacker Psch 5"-500	5 3/4	8...11	122...132	118	47	1480	2 7/8" EU M1	2 3/8" NU Vr	Setzvorgang mechanisch mit 7,5 Mp
Schlipspacker Psch 6"-500	6 5/8	7...12	144...154	138	57	1510	3 1/2" EU M1	2 7/8" NU Vr	Setzvorgang mechanisch mit 7,5 Mp
Schlipspacker PG 5"-500	8 5/8	7...12	197...205	192	76	1650	4 1/2" EU M1	3 1/2" NU Vr	Setzvorgang mechanisch mit 5 Mp
Hydraulischer Packer PG 6"-500	6 5/8	7...12	144...154	138	57	1275	3 1/2" EU M1	2 7/8" Nu Vr	ohne Fuß- ventil
Hydraulischer Anker ¹⁾ JAMA 5"-500	5 3/4	8...11	122...132	118	70	800	2 7/8" NU Mr	2 7/8" EU V1	-
Hydraulischer Anker Jag 6"-500	5 5/8	7...12	144...154	138	63	970	3 1/2" NU Mr	3 1/2" EU V1	-
Hydraulischer Anker Jag 8"-350	8 5/8	7...12	197...205	192	74	1150	4 1/2" NU Mr	4 1/2" EU V1	-

1) verbesserte Konstruktion

Tabelle 9. Technische Daten der Packer HRP-1 (USA)

Bezeichnung des Packers		Abmessung der Futterrohre	Wanddicke der Futterrohre	Innendurchmesser der Futterrohre	Außendurchmesser des Packers	Innendurchmesser des Packers	Kopfanschluß des Packers	Fußanschluß des Packers
in Zoll	in lb/ft	in Zoll	in mm	in mm	in mm	in mm		
7 5/8	33,7...39,0	7 5/8	10,92...12,70	171,8...168,3	158,8	73,0	3 1/2" EU M	3 1/2" EU V
7	17,0...20,0	7	5,78... 6,91	166,1...164,0	158,8	73,0	3 1/2" EU M	3 1/2" EU V
	29,0...38,0	7	10,36...13,72	157,1...150,4	144,4	60,3	2 7/8" EU M	2 7/8" EU V
5 5/8	20,0...24,0	5 5/8	7,32... 8,94	153,6...150,4	144,4	60,3	2 7/8" EU M	2 7/8" EU V
	24,0...32,0	6 5/8	8,94...12,06	150,4...144,1	139,7	60,3	2 7/8" EU M	2 7/8" EU V
5 3/4	22,5	5 3/4	-	128,0...122,0	114,3	49,2	2 3/8" EU M	2 3/8" EU V
5 1/2	14,0...20,0	5 1/2	6,20... 9,17	127,3...121,4	114,3	49,2	2 3/8" EU M	2 3/8" EU V
5	11,5...15,0	5	5,59... 7,52	115,8...112,0	107,1	49,2	2 3/8" EU M	2 3/8" EU V
	15,0...18,0	5	7,52... 9,19	112,0...108,6	101,6	49,2	2 3/8" EU M	2 3/8" EU V
4 1/2	9,5...13,5	4 1/2	5,21... 7,37	103,9... 99,6	95,3	47,6	2 3/8" EU M	2 3/8" EU V

- Lösen: nach 4 Umdrehungen rechts am Packer werden Zirkulationsöffnungen für den Druckausgleich zwischen Ring- und Steigraum frei, nach weiteren 12 Umdrehungen ist der Packer gelöst
- Bewertung des Packers: Einsatz als Behandlungspacker in größeren Teufen möglich
- Nachteile des Packers: kein Sicherheitsverbinder im Packer, keine Niederhaltevorrichtung
- technische Daten dieses Packertyps: siehe Tabelle 9

5.1.2.2. Spezielle Komplettierungselemente

Bei komplizierten Operationen in der Sonde (Fracbehandlung) können spezielle Komplettierungselemente in den Behandlungsstrang eingebaut werden:

- Landenippel D: (ermöglicht folgende Operationen)
 - Abdrücken des Behandlungsstranges in der Sonde nach vorherigem Setzen eines Stopfens
 - Abdichten des Steigraumes gegen den Speicher durch Setzen eines CA-Stopfens
 - Absetzen eines Tiefenmanometers
- Trennstück LJ-1: Sicherheitsverbinder über dem Packer, Trennung des Steigrohrstranges vom Packer durch 1/4 Umdrehung links, Verbindung des Steigrohrstranges mit dem Packer durch Auffahren
- Trennstück LJD-1: Sicherheitsverbinder mit integriertem Landenippel
- Schiebemuffe C: Herstellen der Zirkulation zwischen Steigraum und Ringraum ohne Lösen des Packers. Öffnen und Schließen ist beliebig oft möglich.

Die genannten Operationen werden mittels Wire-line-Arbeiten (Drahtseil-Technik) durchgeführt. Technische Daten der Komplettierungselemente enthält Tabelle 10.

Des Weiteren ist bei Packereinsätzen in größeren Teufen die Verwendung eines Steigrohrdehnstückes vorteilhaft. Nach dem Setzen des Behandlungspackers wird das Steigrohrdehnstück ausgeklinkt und in Test- oder Förderstellung gefahren.

Tabelle 10. Technische Daten. Untertägiger Ausrüstungen für Behandlungspacker (USA)

Bezeichnung	Abmessung	Außen- durch- messer	Innen- durch- messer	Anschluß Kopf	Anschluß Fuß	Bemerkungen
	in Zoll	in mm	in mm			
Setzvorrichtung	2 3/8	77,8	49,2	2 3/8 EU M	-	Nach Kugleinwurf hydraulisches Setzen des Packers Kugeldurchmesser 2 3/8" = 38,1 mm Kugeldurchmesser 2 7/8" = 50,8 mm
	2 7/8	84,2	60,3	2 7/8 EU M	-	
Trennstück LJ-1	2 3/8	95,3 ¹⁾	50,8	2 3/8 EU M	2 3/8 EU V	Trennung des Steigrohrstranges vom Packer durch 1/4 Umdrehung links unter Spannung. Verbindung des Steigrohrstranges mit dem Packer durch Auffahren. Durch die Ausführung mit Oberwaschrohr können Ablagerungen auf dem Packer ausgespült werden.
		108,0 ²⁾	50,8	2 3/8 EU M	2 3/8 EU V	
		123,7 ³⁾	50,8	2 3/8 EU M	2 3/8 EU V	
	2 7/8	112,7 ¹⁾	60,3	2 7/8 EU M	2 7/8 EU V	
		127,0 ³⁾	60,3	2 7/8 EU M	2 7/8 EU V	
Trennstück LJD-1	2 3/8	95,3	46,1	2 3/8 EU M	2 3/8 EU V	mit Landennippelprofil zum Absetzen eines Manometers oder eines CA- bzw. P-Stopfens zum Abdichten des Steigraumes gegen den Speicher
	2 7/8	127,0	57,2	2 7/8 EU M	2 7/8 EU V	
Schiebemuffe C	2 3/8	77,8	49,2	2 3/8 EU M	2 3/8 EU V	Öffnen und Schließen mittels Schlaggerät Herstellen der Zirkulation zwischen Steigraum und Ringraum ohne Lösen des Packers
	2 7/8	95,3	59,5	2 7/8 EU M	2 7/8 EU V	
	3 1/2	107,9	73,8	3 1/2 EU M	3 1/2 EU V	
Landennippel D	2 3/8	65,9	46,1	2 3/8 EU M	2 3/8 EU V	dient zum Absetzen eines Manometers oder eines CA- bzw. P-Stopfens und damit der Abdichtung des Steigraumes
	2 7/8	78,6	57,2	2 7/8 EU M	2 7/8 EU V	
	3 1/2	95,3	69,9	3 1/2 EU M	3 1/2 EU V	
Landennippel W-1	2 7/8	92,1	58,8	2 7/8 EU M	2 7/8 EU V	wie bei Landennippel D
	3 1/2	95,3	71,5	3 1/2 EU M	3 1/2 EU V	

¹⁾Ohne Oberwaschrohr

²⁾mit Oberwaschrohr für Futterrohre 5 1/2" bis 6 5/8"

³⁾mit Oberwaschrohr für Futterrohre 6" bis 7 5/8"

Längenänderungen des Steigrohrstranges während der Injektion kalter Behandlungsflüssigkeiten oder während der Förderphase werden vom Steigrohrdehnstück aufgenommen, ohne daß der Behandlungspacker belastet wird.

5.1.2.3. Erosionsperforatoren

Die Perforatoren für die Erosionsperforation bestehen grundsätzlich aus folgenden Teilen:

- Perforatorgehäuse mit den vertikalen und horizontalen Perforationsöffnungen. Der Außendurchmesser des Perforatorgehäuses variiert im Bereich von 93 bis 180 mm.
- Düseneinsätze, die in das Perforatorgehäuse eingeschraubt werden
- Düsen, die in die Düseneinsätze eingelötet werden. Die aus Hartmetall bestehenden Düsen haben einen Düsendurchmesser (Innendurchmesser) von 3,5 bis 6 mm. Die Düsen bestehen aus einem konvergenten Teil und einem geraden Teil. In ihnen erfolgt die Umsetzung der Druckenergie (Differenzdruck an den Düsen) in Geschwindigkeitsenergie.

Nach der Zielstellung der geplanten Erosionsperforation wird der Perforator entsprechend komplettiert.

Vertikalperforation

Die horizontalen Perforationsöffnungen im Perforatorgehäuse werden blindgeschlossen. Der Erosionsstrahl tritt durch die vertikalen Düsen aus.

Horizontalperforation

Je nach Anzahl der gewünschten Perforationen je Ebene werden zwei oder vier Perforationsöffnungen mit den Düsen komplettiert oder blind geschlossen. Die Perforationsöffnungen in einer Ebene sind dabei um 180° oder 90° versetzt. Durch Einbau von Zwischenstücken kann gleichzeitig oder nacheinander in mehreren Ebenen perforiert werden. Der Abstand zwischen den Ebenen kann beliebig gewählt werden. Beim Einbau ist die

Bodendüse offen. Vor Beginn der Horizontalperforation wird diese Bodendüse durch eine Kugel verschlossen. Nach Beendigung der Horizontalperforation wird die Kugel über der Bodendüse durch Linkszirkulation ausgespült, oder es werden mittels einer weiteren Kugel vertikale Spülkanäle geöffnet. Der in der Sonde abgesetzte Sand kann durch Zirkulation rechts ausgespült werden.

Ist ein Aufspülen nach der Perforation nicht nötig, kann über den Perforator ein Fensterstück angebracht werden. Dieses Fensterstück wird ebenfalls mit Hilfe einer Kugel geöffnet und erlaubt die Zirkulation über Ring- und Steigraum oder umgekehrt.

5.2. Vorbereitungen von Stimulationen

5.2.1. Laborative Vorbereitung der geplanten Stimulationen

Die laborativen Arbeiten erstrecken sich auf:

- die Auswahl der Behandlungsflüssigkeit in Abhängigkeit von der Zielstellung (Beseitigung der Bohrlochschädigung, Verbesserung der primären Permeabilität). Zu diesem Zweck werden Tests unter lagerstättenähnlichen Bedingungen mittels einer Fließapparatur durchgeführt.
- die Auswahl spezieller Zusätze zum Korrosionsschutz, zur Verminderung der Reibungsverluste, zur Verringerung der Filtration aus der Kluft in die Matrix, zur Verhütung von Ausfällungen im Speicher, zur Verbesserung der Rückführung der abreagierten Behandlungsflüssigkeit, zur Verhinderung von Wasser- und Emulsionsblockierungen im Speicher. Zu diesem Zweck werden Korrosionsteste, Verträglichkeitsteste unter übertägigen sowie speicherähnlichen Bedingungen zwischen Schichtinhalt, Behandlungsflüssigkeit und abreagierter Behandlungsflüssigkeit sowie statische und dynamische Filterpressenteste durchgeführt.
- die Ermittlung der Reaktionszeit unter lagerstättenähnlichen Bedingungen
- den Einsatz der Behandlungsflüssigkeiten im Winterhalbjahr

- Vorschläge zum Anrühren der Behandlungsflüssigkeiten im Feld
- die Eignungseinschätzung der vorgesehenen Stützmaterialien für Fracbehandlungen mittels Testen am Kernmaterial

Es ist erforderlich, daß folgende Materialien und Daten zur laborativen Vorbereitung zur Verfügung gestellt werden:

- Förder- bzw. Testverhalten der Sonde vor der Stimulation
- Kernmaterial, mineralogische Zusammensetzung des Speichers
- Lagerstättentemperatur und Lagerstättendruck
- Flüssigkeitsproben vom Schichtinhalt (Erdöl, Schichtwasser) und von dem Wasser, mit dem die Rezeptur angerührt wird

5.2.2. Technologische Vorbereitung der vorgesehenen Behandlungen

Die technologische Vorbereitung umfaßt die Erarbeitung und Bestätigung des Projektes mit folgenden Teilen:

- geologischer Teil, in dem die geologisch-lagerstättenkundliche Situation, die Zielstellung der vorgesehenen Arbeiten, die reservoirmechanischen Untersuchungen und die Meßprogramme präzisiert sind
- technisch-technologischer Teil mit der Darlegung der technischen Situation der Sonde und den Besonderheiten des Objektes, der Präzisierung und Begründung der technischen Ausrüstung, den Berechnungen für den Materialeinsatz, dem technologischen Ablauf der Arbeiten mit der Konzipierung optimaler Varianten gemäß Aufgabenstellung aus dem geologisch Teil, den Terminen, den Verbindlichkeiten für die einzelnen Arbeitsetappen sowie die Einbeziehung von Kooperationspartnern (z. B. Gesteinestest, Bohrlochgeophysik)
- Teil für Gesundheits- und Arbeitsschutz
- ökonomischer Teil

Zur technologischen Vorbereitung zählt weiterhin die Erarbeitung von Arbeitsprogrammen durch die Kooperationspartner mit den erforderlichen Berechnungen (z. B. Packerberechnungen)

sowie die Einweisung des Arbeitskollektives in die geplanten Arbeiten.

5.2.3. Technische Vorbereitungen

Die technischen Vorbereitungsarbeiten lassen sich unterteilen in die

- Vorbereitung der zu behandelnden Sonde
- übertägigen Vorbereitungsarbeiten

Die Arbeiten zur Vorbereitung der zu behandelnden Sonde schließen ein:

- Einhaltung der im Projekt geforderten Spülungsparameter
- Klarspülen der Sonde, besonders wichtig in Vorbereitung eines Packereinbaues und einer Erosionsperforation (Verstopfen der Perforationsdüsen). Die Sonde ist bis zur geforderten künstlichen Endteufe aufzuwältigen.
- Durchführung erforderlicher bohrlochgeophysikalischer Messungen (Flowmetermessung, Zementlog)
- Durchführung erforderlicher Teste zur Bestimmung der Leistungsparameter der Sonde (Gestängetest in der Endverrohrung, Casingtest)
- Überprüfung der Maßhaltigkeit der Endrohrtour vor Einbau eines Behandlungspackers
- Einhaltung der Einbautechnologie des Behandlungsstranges. Es dürfen nur Materialien mit einem gültigen Prüfattest eingesetzt werden. Das gilt für alle Steigrohre, Übergänge, Verbindungselemente und Flansche.
- Installation einer typengerechten Bohrlochkopfausrüstung
- Installation funktionstüchtiger Meßeinrichtungen am Sondenkopf
- Einbindung aller Ringräume in ein typengerechtes Eruptionsmanifold, um im Havariefall in kürzester Zeit Totpumparbeiten aufnehmen zu können

Die übertägigen Vorbereitungsarbeiten schließen ein:

- Herrichten des Aufstellungsplatzes für Aggregate und Behälter
- Aufstellen und Montage der benötigten Behälterbatterie mit einem Saugmanifold. Die Behälter müssen untereinander abgeschiebert werden können.
- Bereitstellung der erforderlichen untertägigen Ausrüstungen sowie der Materialien und Flüssigkeiten zur Herstellung der Behandlungsflüssigkeit
- Aufstellen der Aggregate unter Einhaltung der einschlägigen Sicherheitsabstände
- Komplettierung der Saug- und Druckleitungssysteme. Dabei zu beachten, daß das Druckleitungssystem spannungsfrei verlegt wird. Beanspruchungen auf Zug, Biegung oder Knickung müssen vermieden werden. Die Dichtflächen der Schnellkuppelungsverbindungen dürfen keine Beschädigungen aufweisen und müssen gut gesäubert sein.
- Abdrücken aller Druckleitungen bis zum Sondenkopf (Steig- und Ringraum) mit dem 1,5fachen des zu erwartenden Arbeitsdruckes, maximal bis zum zulässigen Nenndruck.

5.3. Ausführung der Behandlungen

Vom exakten technologischen Ablauf der jeweiligen Stimulation hängt das Erreichen der Zielstellung der Behandlung wesentlich ab. Alle Unregelmäßigkeiten, Unterbrechungen oder nicht eingehaltene Pumpregime können die Effektivität der Stimulation in Frage stellen. Ein exaktes Arbeiten aller Beteiligten ist erforderlich. Voraussetzung dafür ist, daß alle Kollegen der Bohr-, Test- und Behandlungskollektive über die durchzuführenden Arbeiten aktenkundig belehrt werden.

5.3.1. Formationswaschungen und Säurebehandlungen

In Abhängigkeit der Installation der Sonde sind nachstehende technologische Varianten möglich:

5.3.1.1. Behandlung bei abgestelltem oder freihängendem Behandlungsstrang - Volumen der Behandlungsflüssigkeit ist kleiner als das Steigraumvolumen

- Einzirkulieren der Behandlungsflüssigkeit in den Steigraum bei geöffnetem Ringraum
- Nachpumpen von Süßwasser, bis das Steigraumvolumen erreicht ist
- Ringraum schließen
- Nachpressen von Wasser in den Steigraum, bis das Nachpreßvolumen dem einzirkulierten Säurevolumen entspricht
- Reaktionszeit bzw. Freiförderung über Steigraum

5.3.1.2. Behandlung bei abgestelltem oder freihängendem Behandlungsstrang - Volumen der Behandlungsflüssigkeit ist größer als das Steigraumvolumen

- Einzirkulieren eines Steigraumvolumens an Behandlungsflüssigkeit bei geöffnetem Ringraum
- Ringraum schließen
- Verpressen der restlichen Behandlungsflüssigkeit und eines Steigraumvolumens Nachpreßwasser
- Reaktionszeit bzw. Freiförderung über Steigraum

5.3.1.3. Behandlung mit Behandlungspacker - Volumen der Behandlungsflüssigkeit ist kleiner als das Steigraumvolumen

- Einzirkulieren der Behandlungsflüssigkeit in den Steigraum bei geöffnetem Ringraum
- Nachpumpen von Süßwasser, bis das Steigraumvolumen erreicht ist
- Setzen des Packers

- Entsprechend dem Arbeitsprogramm ist ein Schutzdruck auf den Ringraum zwischen Behandlungsstrang und Endrohrtour auszuüben oder diesen Ringraum offen zu lassen und auf Oberlauf zu kontrollieren
- Nachpressen von Süßwasser in den Steigraum, bis das Nachpreßvolumen dem einzirkulierten Säurevolumen entspricht
- Reaktionszeit bzw. Freiförderung über Steigraum

5.3.1.4. Behandlung mit Behandlungspacker - Volumen der Behandlungsflüssigkeit ist größer als das Steigraumvolumen

- Einzirkulieren eines Steigraumvolumens an Behandlungsflüssigkeit bei geöffnetem Ringraum
- Setzen des Packers
- Entsprechend Arbeitsprogramm Schutzdruck auf Ringraum zwischen Behandlungsstrang und Endrohrtour ausüben oder Ringraum offen lassen und auf Oberlauf kontrollieren
- Verpressen der restlichen Behandlungsflüssigkeit und eines Steigraumvolumens Nachpreßwasser
- Reaktionszeit bzw. Freiförderung über Steigraum

5.3.1.5. Behandlung bei Permanentinstallation

- Schutzdruck auf Ringraum zwischen Behandlungsstrang und Endrohrtour gemäß Arbeitsprogramm ausüben
- Verpressen der Behandlungsflüssigkeit und des Nachpreßwassers über den Steigraum. Das sich im Steigraum befindliche Medium wird in den Speicher verpreßt. Die im Arbeitsprogramm angegebene minimale Temperatur der Behandlungsflüssigkeit ist einzuhalten.
- Reaktionszeit bzw. Freiförderung über Steigraum

5.3.2. Fracbehandlung

Wegen der zu erwartenden hohen Kopfdrücke bei der Injektion der Aufbrech- und Trägerflüssigkeit werden Fracbehandlungen unter Verwendung von Packergarnituren durchgeführt.

- Einbau der Packergarnitur sowie der anderen untertägigen Komplettierungselemente bis zur Packersetzteufe
- Abdrücken des Behandlungsstranges gemäß den Angaben im Arbeitsprogramm nach dem Setzen eines Fußventils in einem Landenippel
- Ausbau des Fußventils
- Montage des Frackopfes
- Einzirkulieren der technischen Flüssigkeit in den Behandlungsstrang
- Setzen des Packers
- Ablanden des Behandlungsstranges im Landekonus bzw. Absetzen des Behandlungsstranges auf dem Drehtisch und Schließen des Preventers (EU-Muffe unter Preventerbacken)
- Anrühren der Behandlungsflüssigkeit
- Aufstellen der Aggregate, Montage der Saug- und Druckleitungen
- Abdrücken des Hochdrucksystems zum Steigraum und Ringraum
- Schutzdruck auf den Ringraum zwischen Behandlungsstrang und Endrohrtour ausüben
- Durchführung der Behandlung, wobei das Injektionsregime operativ vom Leiter der Behandlung angewiesen wird
- Einpumpen der Nachpreßflüssigkeit
- Sonde zur Reaktionszeit bzw. zum Druckabfall schließen

5.3.3. Erosionsperforation

Vor Beginn der Erosionsperforation wird der Behandlungsstrang mittels markierter Isotopenmuffen und Gammamessung durch die Bohrlochgeophysik eingemessen und der Perforator im Perforationsintervall fixiert. Damit werden Längenänderungen des Behandlungsstranges durch das Eigengewicht, die Temperatur und durch das Verschrauben des Stranges eliminiert. Die Längen-

Änderung durch den Differenzdruck an den Düsen wird berechnet und im Arbeitsprogramm zur Erosionsperforation angegeben.

Zur Sicherung des Ringraumes zwischen Endverrohrung und Behandlungsstrang werden Preventer mit Vollabschluß und entsprechenden Backeneinsätzen benutzt.

Die Erosionsperforation wird wie folgt durchgeführt:

- Schließen des Bodenventils durch Kugleinwurf
- dynamisches Abdrücken des Behandlungsstranges vor der Zugabe des Abrasivmaterials (Sand)
- Einfahren des projektierten Injektionsregimes
- Perforation der jeweiligen Ebene gemäß projektiertem Kopfdruck, projektierte Injektionsrate sowie angegebener Perforationsdauer
- nach der Perforation der entsprechenden Ebene Arbeitsdruck verringern, Preventer öffnen, Behandlungsstrang auf das nächsthöhere Intervall ziehen, Preventer schließen, Fortsetzung der Perforation
- Nach Beendigung der Perforation wird entweder die Kugel über die Bodendüse durch Linkszirkulation ausgespült, oder es werden durch Einschleußen einer weiteren Kugel Spülkanäle im Perforator geöffnet. Der abgesetzte Sand wird bis zur künstlichen Endteufe ausgespült.
- Ist es erforderlich, eine Zuglänge des Behandlungsstranges auszubauen, wird ohne Sand ein Bohrlochvolumen zirkuliert und die Perforation unterbrochen. Nach Ausbau des Zuges wird die Perforation mit den gleichen Arbeitsgängen wiederholt.

5.3.4. Stimulation mit flüssigem CO₂

Für den Transport von flüssigem CO₂ sind spezielle Transportfahrzeuge erforderlich. Nachstehend wird ein Typ dieser Transportfahrzeuge mit den entsprechenden technischen Daten angegeben:

- Fahrzeug: Volvo-Sattelschlepper
 - Zisterne: wärmeisolierte Großraumzisterne
- Volumen: 20 t CO₂-flüssig (18,2 m³)

- Temperatur: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Druck: 13 bis 15 kp cm^{-2}
- Entleerung: mittels Zahnradpumpe
- Anschluß des Entleerungssystemes: spezieller Übergang auf 2" SKV
- Maximale Pumprate während der Entleerung: 250 bis 300 l min^{-1}

Beim Verpumpen des CO_2 -flüssig müssen folgende Gesichtspunkte beachtet werden:

- Die Bildung einer Gasphase im Saugsystem und im Pumpenkörper der Pumpfahrzeuge muß während des Injektionsvorganges vermieden werden.
- Der Druck im Saug- und Drucksystem muß über dem kritischen Druck von $5,28\text{ kp cm}^{-2}$ liegen, um die Bildung von Trockeneis und damit das Verstopfen des Leitungssystemes zu vermeiden.
- Die Zuordnung zur Behandlungsflüssigkeit muß so erfolgen, daß der Gefrierpunkt dieser Flüssigkeit nicht unterschritten wird. Die Mischungstemperatur wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$t_m = \frac{c_2 t_2 + \frac{m_1}{m_2} c_1 t_1}{c_2 + \frac{m_1}{m_2} c_1} \quad \text{in } ^{\circ}\text{C} \quad (22)$$

- $\frac{m_1}{m_2}$ Mischungsverhältnis von CO_2 -flüssig zur Behandlungsflüssigkeit in t m^{-3}
- t_1 Temperatur des CO_2 -flüssig in $^{\circ}\text{C}$
- t_2 Temperatur der Behandlungsflüssigkeit in $^{\circ}\text{C}$
- c_1 spezifische Wärme des CO_2 -flüssig
(= $0,5\text{ kcal kg grd}^{-1}$ bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- c_2 spezifische Wärme der Behandlungsflüssigkeit
(= $0,75\text{ kcal kg grd}^{-1}$ für 10%ige Salzsäure)

- Meßeinrichtungen (Manometer, Thermometer), Rückschlagventile sowie die Pumpen müssen durch Präparierung mit Frostschutzmitteln gegen Vereisung geschützt werden.

5.3.5. Tensid- und Säurewanne

- Einzirkulieren des Tensid- oder Säuregemisches in den Steigraum bei geöffnetem Ringraum
- Nachpressen von Süßwasser entsprechend dem Steigraumvolumen bei geöffnetem Ringraum
- Steigraum und Ringraum schließen, Sonde zur Reaktion stehen lassen
- nach der Reaktionszeit Tensid- oder Säuregemisch in die Schlammgrube oder den Rücklaufbehälter links auszirkulieren

5.4. Nachfolgearbeiten

Nach Beendigung der Injektion der Behandlungsflüssigkeiten folgen nachstehende Arbeitsetappen mit ihren speziellen Besonderheiten:

- Reaktionszeit
Sie dient der weiteren Einwirkung der Behandlungsflüssigkeiten auf das Speichergestein oder die Schichtmedien bzw. der Zerstörung strukturviskoser Behandlungsflüssigkeiten (z. B. bei Fracbehandlungen) unter Lagerstättenbedingungen. Die Dauer der Reaktionszeit ist abhängig von der Zielstellung der durchgeführten Stimulation, der Art der Behandlungsflüssigkeit sowie der Stimulationsmethode. Bei Säurungen wird die Reaktionszeit möglichst kurz gewählt, da die Rückförderung zur Vermeidung von Ausfällungen noch mit einem bestimmten Restsäuregehalt erfolgen soll.
- Technisches Freifördern
Während der Periode des technischen Freiförderns der behandelten Sonde soll die Behandlungsflüssigkeit möglichst vollständig aus dem Speicher und der Sonde ausgetragen werden. Dabei muß darauf geachtet werden, daß keine nachteiligen Effekte auf die zu erwartende Effektivität der Be-

handlung entstehen (z. B. Austrag von Stützmaterial nach einer Fracbehandlung oder eines Frac-pac, Zerstörung des Stützmaterials im Riß bei hohen Depressionen).

- Ausbau der Packergarnitur und des Behandlungsstranges
Zum Ausbau der Packergarnitur und des Behandlungsstranges ist das Totpumpen der Sonde, meist mit Spülung, erforderlich. Diese Totpumparbeiten sind sorgfältig vorzunehmen, um eine erneute Schädigung des Speichers zu vermeiden.