

## 2. Zementationsverfahren

### 2.1. Aufgaben der Zementation

In der Tiefbohrtechnik nimmt der Komplex der Bohrlochbefestigung bei der Bohrlochkomplettierung eine Schlüsselposition ein. Zu diesem Komplex zählen die Festlegung der Bohrlochkonstruktion und die Zementation der Futterrohrtouren. Beim Abteufen von Bohrungen nimmt die Zementation eine nicht zu unterschätzende Rolle ein. Oftmals hängt von der qualitätsgerechten Zementation der ökonomische Nutzen und die Effektivität einer Bohrung ab. Die Zementation ist ein unwiederholbarer Arbeitsprozeß. Eventuell erforderliche Reparaturarbeiten, d. h. Nachzementationen, gestalten sich sehr kompliziert und sind mit einem hohen Maß an Zeit und einem noch größeren Kostenaufwand verbunden. Schwere Bohrlochkonstruktionen erfordern eine exakte Durchführung der Zementagearbeiten und eine leistungsfähige Zementageausrüstung. Unbekannte und sehr wechselhafte geologische Verhältnisse stellen neue Probleme an die Zementagetechnik. Genaue Kenntnisse der geologischen Beschaffenheiten des Untergrundes und die daraus resultierende richtige Auswahl der Futterrohre sowie ihrer Zementkopfhöhen schaffen ihrerseits die Voraussetzungen, daß die Zementation die an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Von der Planung und Durchführung einer Bohrlochzementation muß der Zweck der Zementation zur Festlegung der Zementationstechnologie klar herausgestellt sein. Gründe für die Zementation von Rohrtouren sind:

1. Verstärkung und Schutz der eingebauten Rohrtouren
2. Sicherheit beim Weiterbohren
3. Isolierung von Produktionshorizonten
4. Ermöglichung selektiver Formationsbehandlung
5. Sicherstellung einwandfreier Produktion

Die Wertigkeit der Gründe für die Zementation entspricht nicht der genannten Reihenfolge, sondern sie wird von der spezifischen Aufgabenstellungen der eingebauten und zu zementierenden Rohrtour bestimmt. Durch das Auskleiden des Ringraumes

zwischen Bohrlochwand und Rohren, durch das Umkleiden der Rohrtour mit einem Zementmantel wird die Rohrtour sowohl mechanisch fixiert als auch ein flüssigkeits- und gasdichter Verschluss des Ringraumes gewährleistet. Demzufolge leiten sich folgende Aufgabenstellungen für die Zementation ab:

- feste Verankerung der Futterrohrtouren im Bohrloch durch gute Haftung des Zementsteines sowohl mit den Rohren als auch mit dem Gebirge
- mechanische Versteifung der Rohrtouren zum Schutz vor zu hohen Schichtdrücken und Belastungen
- Schutz der Futterrohrkolonnen vor Korrosionen gegenüber den im Bohrloch befindlichen aggressiven Schichtwässern
- Abdichtung des Ringraumes nach Übertage
- Schichtentrennung zur Vermeidung von Hinterrohrzirkulationen von Flüssigkeiten und Gasen aus druckstärkeren in druckschwächere Horizonte
- Isolation von kohlenwasserstoffhaltigen Speicherhorizonten zum selektiven Aufschluß

Entsprechend der Aufgabenstellung der Zementation sind die Kriterien des Zementationsverfahrens und der Zementrezeptur so zu wählen, daß der sich im Ringraum bildende Zementmantel den Zweck der Zementation erfüllt.

## 2.2. Bohrlochkonstruktion - bestimmender Faktor bei der Wahl der Zementationsart

Beim Niederbringen von tiefen Bohrungen kommen die verschiedenartigsten Bohrlochkonstruktionen zur Anwendung. In der Bohrpraxis der DDR wird überwiegend ein fünfteiliges Verrohrungsschema angewandt. Die Auswahl dieser Bohrlochkonstruktion wird auf Grund des geologischen Profils der Bohrung, der Bohrtechnologie beim Abteufen des Bohrloches und der anschließenden Fördertechnik bestimmt. Unter dem Ausdruck der Bohrlochkonstruktion versteht man die Gesamtheit der einzubauenden Rohrkolonnen mit den Angaben ihrer Dimension, Güte und Wanddicke, ihrer Einbauteufen, der Zementkopfhöhen und der Bohrlochdurchmesser, d. h. der Dimension der Meißel,

mit denen das jeweilige Intervall erschlossen wurde. Von der richtigen Wahl dieser genannten Parameter hängt der mit einer Bohrung verbundene Kostenaufwand ab. Es liegt klar auf der Hand: je kleiner die Bohrlochdurchmesser, desto geringer ist der Materialbedarf und Zeitaufwand, um so wirtschaftlicher das Abteufen der Bohrung. Bei Produktionsbohrungen wird die Dimension der Förderrohrtour auf die zu erwartende Förderrate der Bohrung ausgelegt. Eine größere Fördermenge verlangt eine größere Dimension, um den hohen Druckverlusten in einem kleinen Rohrquerschnitt entgegenzuwirken. Es macht sich oftmals notwendig, mehrere Zwischenrohr Touren einzubauen und den Futterrohren größere Radialspele im Bohrloch zu geben, um bei eventuellen Komplikationen die Möglichkeit des Einbaues einer Reserverohrtour zu schaffen. Hohe Schichttemperaturen und Schichtdrücke gestalten die Auswahl der Zementrezepturen problematisch. Hohe Drücke setzen dem Leistungsvermögen der vorhandenen Zementieraggregate Grenzen, denen durch entsprechende Zementationstechnologien und den Einsatz von leichten Zementschlämmen zu begegnen ist. Die Gebirgstemperaturen sind eines der Hauptauswahlkriterien für die einzusetzenden Zementrezepturen. Wesentlich kritischer ist eine Zementation in wechselnden druckstarken und druckschwachen Horizonten.

### Standrohr

Die erste Rohrtour, die zum Einsatz gelangt, ist das Standrohr. Es soll dem Bohrloch den genügenden Halt gegenüber den sehr lockeren oberen Sand-, Kies- und Geröllschichten verleihen. Das Standrohr hat gewöhnlich eine Länge von 10 bis 30 m. Der Durchmesser dieser Rohrtour schwankt in der Regel zwischen 18 3/4" und 24", in Ausnahmefällen bis 32" und mehr, und er richtet sich nach der Anzahl und Dimension der projektierten Rohrtouren. Um den Bohrprozeß beginnen zu können, um den Zyklus des Spülungsumlaufes vom Bohrkeller bis zur Spülrinne zu schließen, ist ein großkalibriges Schachtrrohr, das sogenannte Hilfsstandrohr, bis zu einer Teufe von 2 bis 10 m zu setzen. Das Standrohr wird in streng vertikaler Lage über seine ganze Länge mit reinem Zement (SPZ, HOZ)

von hoher Festigkeit zementiert, um den erforderlichen festen Sitz zu gewährleisten und ein mögliches Unterspülen im weiteren Bohrprozeß zu verhindern.

### Leitrohrtour

Die Leit- oder Ankerrohrtour hat die Aufgabe, das Bohrloch vor dem Zufluß von häufig in dieser Teufe anzutreffenden Schichtwässern zu schützen, lockere Gesteinsschichten abzudecken und dem Bohrloch ein festes Gefüge in den oberen Intervallen zu verleihen. Die Leitrohrtour schafft die Voraussetzung, weiter aus dem Rohrschuh des Standrohres herauszubohren. Die Leitrohrtour wird hauptsächlich als 13 3/4"- bis 16 3/4"-Rohrtour bzw. auch als 18 3/4"-Rohrtour gesetzt. Die Einbauteufe ist sehr unterschiedlich; sie schwankt zwischen 200 und 800 m. Sie wird bestimmt von der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes und von der projektierten Endteufe der Bohrung. Die Ankerrohrtour wird ausschließlich bis über Tage zementiert. Als Zementationsmaterialien werden reine SPZ-Rezepturen oder bei druckschwachen Horizonten Bentonit-zemente verwendet. Auf die Ankerrohrtour werden die weiter einzubauenden Rohrtouren abgesetzt. Außerdem soll der Zementmantel den an und für sich schwachen großkalibrigen Rohren eine genügende Druckfestigkeit verleihen.

### Technische Rohrtour

Da ein unbegrenzter Austritt aus der Leitrohrtour nicht möglich ist, macht sich der Einbau von sogenannten Zwischenrohr-touren erforderlich. Die Aufgabe der Zwischenrohr-touren bestehen in der

- Isolierung der wasserführenden Schichten und Verhinderung eines Zuflusses der aggressiven Mineralwässer ins Bohrloch
- Abdichtung von druckschwachen Horizonten, die die Gefahr von Zirkulationsverlusten in sich bergen
- Oberdeckung von drückenden und quellenden Schichten, die die Fortsetzung des Bohrprozesses durch Festwerden des Instrumentes behindern können

- Absperrung von Salzhorizonten, um einen Spülungswechsel zu normaler, unausgesalzener Spülung vornehmen zu können

Da auf weiten Teufenbereichen Schichten mit den verschiedenartigsten und gegensätzlichsten Merkmalen angetroffen werden, macht sich der Einbau von mehreren Zwischenrohrturen unumgänglich. Die erste technische Rohrtour in der Dimension von  $9 \frac{5}{8}$ " bis maximal  $13 \frac{3}{4}$ " wird bis übertage eingebaut. Eine Zementation über ihre gesamte Länge sollte in jedem Falle angestrebt werden.

Die zweite technische Rohrtour findet ihre häufigste Anwendung in Form eines Liners. Der Liner ist eine Teilrohrtour, die nicht bis übertage hochgezogen ist. Der Liner wird am Bohrgestänge ins Bohrloch eingelassen und ragt bis etwa 100 bis 200 m in die vorhergehende Rohrtour. Der Liner ist über seine gesamte Länge von Rohrschuh bis Oberkante der Rohrtour (Linerkopf) zu zementieren.

#### Endrohrtour bzw. Produktionsrohrtour

Wenn das Bohrloch bis zur Endteufe niedergebracht wurde, erfolgt der Einbau der letzten Kolonne - der Einbau der Produktionsrohrtour. Diese Förderrohrtour ist der Dimension nach die kleinste und längste Rohrtour im Verrohrungsschema. Nicht jede Endrohrtour ist eine Förderrohrtour. Die Definition hängt von der Aufgabenstellung der Bohrung (Erkundungs- oder Produktionsbohrung) ab. Die gebräuchlichsten Dimensionen für Endverrohrungen bzw. Produktionsrohrturen liegen zwischen 5" und 7"; je nach Teufe sind auch die verschiedensten kombinierten Rohrstränge (z. B.  $5" \times 7"$ ,  $5 \frac{3}{4}" \times 6 \frac{5}{8}"$ ) möglich. Die Auswahl der Produktionsrohrtour und die Festlegung der Zementkopfhöhen ist von der Spezifik der Bohrung - Erdölbohrung oder Gasbohrung - getrennt festzulegen. In der Vergangenheit wurde der Ringraum der Förderkolonne über ein langes Intervall zementiert, um einmal die Kolonne vor Korrosion zu schützen und das Bohrloch somit zu konservieren und um zum anderen die sehr lange Förderrohrtour vor der Zerstörung durch Temperaturspannungen zu schützen. Für den Halt der Kolonne und die Abdichtung des Speicherhorizontes nach oben hin ist eine

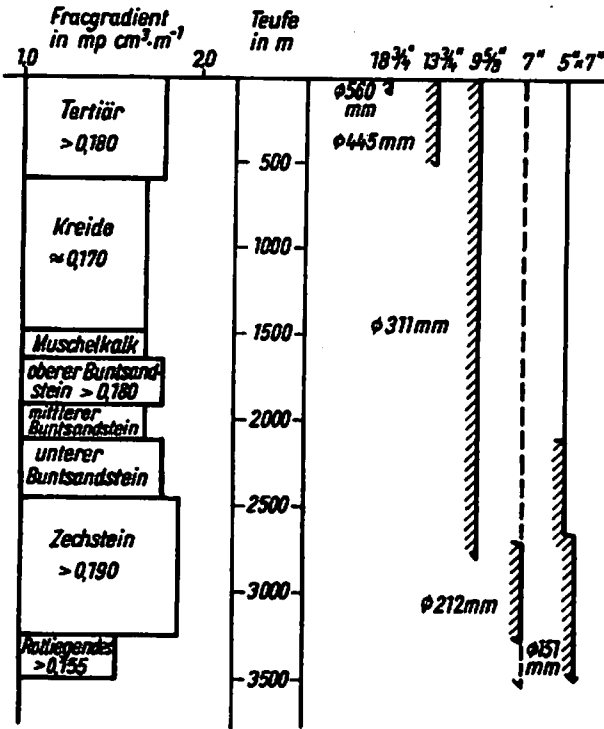


Bild 1. Beispiel einer Bohrlochkonstruktion

dichte Zementsäule von einigen hundert Metern völlig ausreichend. Das Beispiel einer Bohrlochkonstruktion zeigt Bild 1.

### 2.3. Verfahren

In Erfüllung der Aufgabenstellung von Bohrlochzementationen wurden die verschiedensten Zementationsverfahren entwickelt mit dem Ziel, die in den Ringraum einzuzirkulierende Zementschlämme ungeschädigt, möglichst unvermischt und in hoher Qualität in das projektierte Bohrlochintervall zu placieren. Die Qualität der Zementation wird durch die vollständige Auskleidung des Ringraumes zwischen Bohrlochwand und Rohrtour mit einem dichten Zementstein, der die Rohre allseitig umschließt, bestimmt. Das Wesen der Zementationsarbeiten besteht darin, die im Ringraum befindliche Flüssigkeit (Bohrspülung)

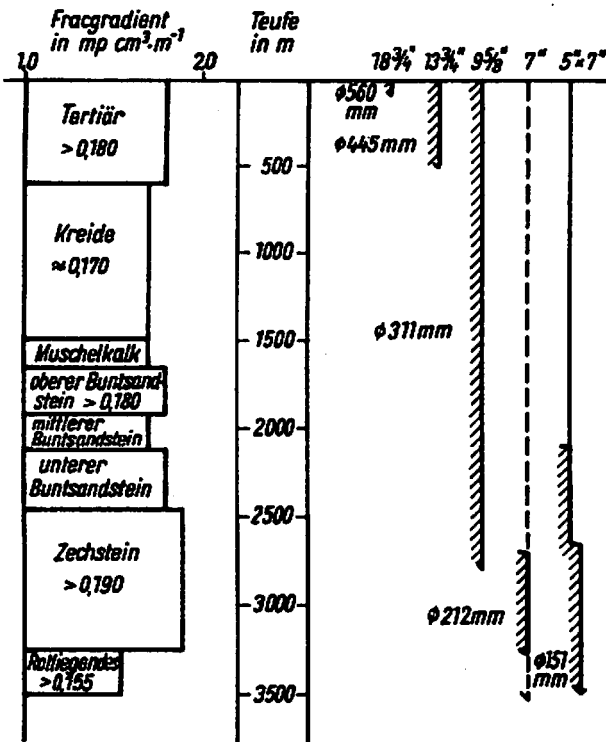


Bild 1. Beispiel einer Bohrlochkonstruktion

dichte Zementsäule von einigen hundert Metern völlig ausreichend. Das Beispiel einer Bohrlochkonstruktion zeigt Bild 1.

### 2.3. Verfahren

In Erfüllung der Aufgabenstellung von Bohrlochzementationen wurden die verschiedensten Zementationsverfahren entwickelt mit dem Ziel, die in den Ringraum einzuzirkulierende Zementschlämme ungeschädigt, möglichst unvermischt und in hoher Qualität in das projektierte Bohrlochintervall zu placieren. Die Qualität der Zementation wird durch die vollständige Auskleidung des Ringraumes zwischen Bohrlochwand und Rohrtour mit einem dichten Zementstein, der die Rohre allseitig umschließt, bestimmt. Das Wesen der Zementationsarbeiten besteht darin, die im Ringraum befindliche Flüssigkeit (Bohrspülung)

durch das Einpumpen einer flüssigen Zementsuspension zu verdrängen. Die Zementationsverfahren und -technologien sind so auszulegen, daß im projektierten Zementationsintervall sich ein qualitativ guter Zementmantel ausbildet. Als Kriterien für das Zementationsverfahren gelten

- die einzusetzende Zementrezeptur mit ihren Parametern, speziell ihrer Dichte und Thermostabilität in Abhängigkeit von den geologischen Bohrlochverhältnissen
- das Pumpregime zur Zementation unter Beachtung der Druckbalance im Bohrloch zur Vermeidung von Zirkulationsverlusten bzw. Zuflüssen sowie eines maximalen Verdrängungsgrades bei geringster Schädigung der Zementschlämme durch große Mischzonen mit Bohrspülung

Sämtliche Zementationsarbeiten gliedern sich in

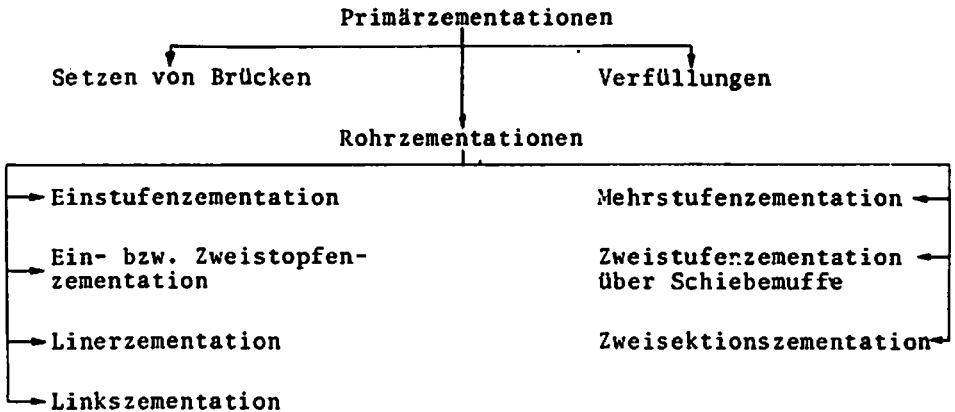
- Primärzementationen und
- Sekundärzementationen

Unter dem Begriff der Primärzementationen sind erstmalige Zementationen zu verstehen. Die Primärzementationen stellen den größten Umfang an Zementationen dar. Zu ihnen zählen vor allem die Rohrmentationen. Bei Sekundärzementationen, d. h. wiederholten Zementationen, handelt es sich um sogenannte Reparaturzementationen. Ein charakteristisches Beispiel für Sekundärzementationen sind die Nachzementationen, wie

- Druckzementation und
- Ringraumzementation

Die Unterteilung der Primärzementationen ist umseitig folgendem Schema zu entnehmen:





### 2.3.1. Primärzementation

Als zahlenmäßig häufigste Zementation ist die Einstufenrohrzementation zu nennen. Unter diesem Begriff sind hauptsächlich die normalen Stopfzementationen zu verstehen. Im weiteren Sinne können aber solche Zementationsarten, wie

- Linerzementation und
- Ringraumzementation

gezählt werden.

#### 2.3.1.1. Stopfzementation

Die Stopfzementation ist eines der Zementationsverfahren, durch das die anfangs genannten Aufgaben einer Zementation praktisch realisierbar sind. Rein technisch und verfahrensmäßig handelt es sich um die einfachste Art der Rohrzementation. Die Stopfzementation ist aus diesem Grunde das am meisten verbreitete und praktizierte Verfahren. Die Stopfzementationen sind in

- Einstopfen- und
- Zweistopfzementationen (s. Bild 2)

zu unterteilen. Einstopfzementationen werden in den Fällen angewandt, wo der Einsatz von zwei Trennstopfen technisch

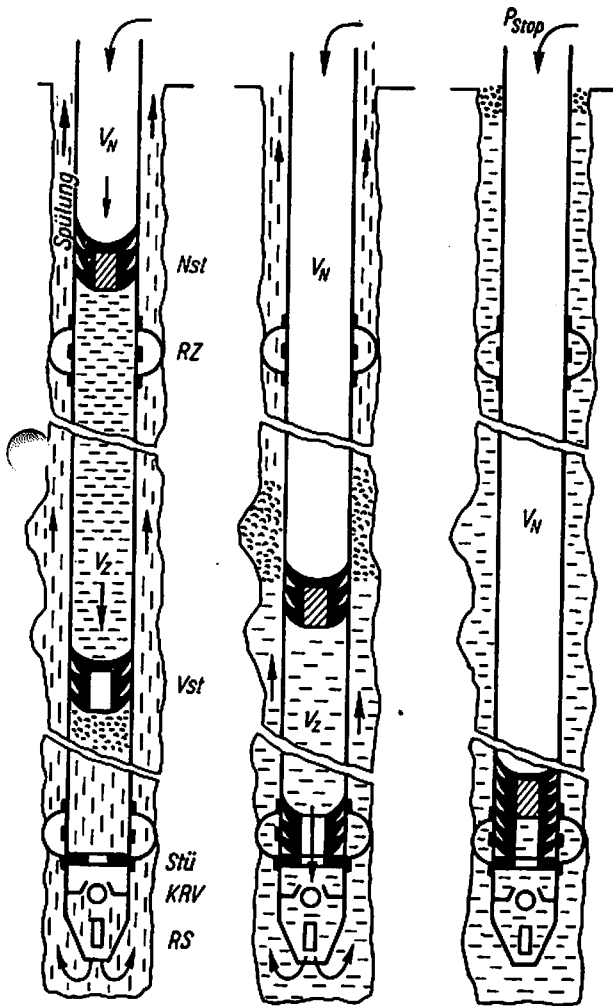


Bild 2  
Prinzip der Zwei-  
stopfenzementation  
VN Volumen-Nachpump-  
flüssigkeit  
Nst Nachstopfen  
RZ Rohrzentralisator  
Vz Volumen-Zement-  
trübe  
Vst Vorstopfen  
StÜ Stopfübergang  
KRV Kugelrückschlag-  
ventil  
RS Rohrschuh

nicht möglich ist, wie z. B. bei Rohrtouren unterschiedlicher Dimension (kombinierte Rohrtouren) und bei großkalibrigen Rohrtouren mit geringer Einbauteufe. Bei der Einstopfenzementation gelangt nur ein Nachstopfen zum Einsatz, der die Zementschlämme von der Nachpumpflüssigkeit in der Rohrtour trennt und eine Vermischung beider Flüssigkeiten bzw. Suspensionen im Bereich der Futterrohre verhindert. Durch die Stopfentrennung steht im Rohrshuhbereich kein durch Spülung geschädigter Zement an. Die sich zwischen der Bohrspülung und

der Zementschlämme bildenden Mischzonen im Bereich des Zementkopfes sollten nach Möglichkeit übertage auszirkuliert werden oder sind durch Einsatz spezieller Trennpuffer auf ein Minimum zu reduzieren. Die Zementschlämme vermischt sich schon zu Beginn des Einpumpens mit der in der Rohrtour befindlichen Spülung in starkem Maße. Die Entstehung der Mischzone ist, wie aus der Strömungslehre bekannt, durch die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten im Rohrquerschnitt theoretisch begründet, die u. a. auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Zementschlämme von der zu verdrängenden Bohrspülung zurückzuführen sind. Der Unterschied der Zweistopfenzementation zur Einstopfenzementation besteht darin, daß durch den Einsatz zweier Stopfen, ein Vor- und ein Nachstopfen, die Zementschlämme innerhalb der Rohrtour völlig getrennt von anderen Flüssigkeiten niedergepumpt wird. Dies hat vor allem den Vorteil, daß durch die Stopfentrennung der Entstehung von Mischzonen zwischen der in der Rohrtour befindlichen Spülung und der Zementschlämme durch den Vorstopfen und der Entstehung von Mischzonen zwischen der Zementschlämme und der sie verdrängenden Nachpumpmenge durch den Nachstopfen entgegengewirkt wird. Da die Zementschlämme unvermischt bis zum Rohrschuh gelangt, können sich Mischzonen nur in der 2. Phase der Zementation - beim Austritt der Zementschlämme aus der Rohrtour in den Ringraum - bilden. Die Rohrtour ist in der Regel für die Durchführung von Stopfenzementationen mit folgenden untertägigen Zementationsausrüstungen (UZ-Materialien) vom Rohrschuh bis Kolonnenkopf zu komplettieren:

- 1 Rohrschuh mit Führungsbirne
- 1 bis 2 Kugelrückschlagventile
- 1 Stopfübergang

Die Rohrtour ist in festgelegten Intervallen mit Rohrzentralisatoren und ggf. mit Kratzern zu bestücken.

#### Ablauf der Zweistopfenzementation

Für den Ablauf einer Zweistopfenzementation sind folgende Arbeitsstufen charakteristisch:

- Aufstellung und Aufbau der Zementiereinrichtungen
  - Aufstellen der Zementieraggregate in Gruppen
  - das Verlegen des Manifolds und des Niederdrucksystems
  - der Anschluß aller Kontroll- und Meßgeräte
  - das Speichern von Pufferflüssigkeiten, Anmischwasser und z. T. Nachpumpmenge
  - der Probelauf der Aggregate
  - Abdrücken des Manifolds
- Herstellen der Zirkulation im Bohrloch
- Vorpumpen einer Pufferflüssigkeit
 

Das Vorpumpen einer Pufferflüssigkeit in der Größenordnung von 3 bis 15 m<sup>3</sup> hat zur Aufgabe, dem direkten Kontakt zwischen Spülung und Zementschlämme beim Austritt in den Ringraum entgegenzuwirken und somit die Bildung von Mischzonen zu reduzieren. Als Pufferflüssigkeiten eignen sich speziell bearbeitete Spülungen bzw. Wasser.
- Einbringen des Vorstopfens in die Rohrtour
- Anmischen der Zementschlämme
 

Das Anmischen der Zementschlämme erfolgt über die Anmischgruppen, bestehend aus Zementmischmaschinen mit Mischerkopf und Anmischaggregaten. Zur Verbesserung der Qualität der Zementschlämme erfolgt das Anmischen der Zementschlämme über einen Sammelbehälter mit Rührwerken (siehe "verzögerte Anmischtechnologie").
- Einpumpen der Zementschlämme
 

Die Zementschlämme wird mittels der Hochdruckpumpe der Zementieraggregate in die Rohrtour eingepumpt. Beim Einpumpen schiebt die Zementschlämme den Vorstopfen vor sich her und verdrängt die Spülung aus der Rohrtour. Eine mechanische Trennung beider Medien ist durch den Vorstopfen gewährleistet. Das Einpumpen kann ohne Gegendruck mit großer Förderleistung der Zementieraggregate erfolgen, ist aber den jeweiligen Bohrlochbedingungen anzupassen
- Lösen des Nachstopfens
 

Vor der Montage des Zementierkopfes auf die Rohrtour ist der Nachstopfen in den Zementierkopf einzulegen und mittels zweier Arretierbolzen fest zu arretieren.

Nach dem Einpumpen der gesamten Zementmenge erfolgt durch beiderseitiges und gleichmäßiges Herausdrehen der Arretierbolzen das Lösen des Nachstopfens. Zum Anpumpen des Nachstopfens wird ein gesondert am Zementierkopfdeckel angeschlossenes Zementieraggregat verwendet.

- Nachpumpen

Hat der Nachstopfen den Zementierkopf passiert und befindet sich in der Rohrtour, wird mit den Zementieraggregaten der Nachpumpvorgang fortgesetzt. Die Fördermenge der Aggregate ist so zu wählen, daß eine effektive Spülungsverdrängung im Ringraum gewährleistet ist.

- Stopdruck

Beim Auftreffen des Nachstopfens auf den Stopfübergang bzw. auf den Vorstopfen tritt infolge des plötzlichen Staus ein Druckanstieg auf. Dieser Druckanstieg zeugt vom Ende des Nachpumpprozesses und somit vom Ende der Zementation, d. h., die Zementsäule muß die vorgegebene Höhe erreicht haben. Der Stopdruck soll 30 bis 40 at über dem Arbeitsdruck am Ende der Zementation liegen.

- Beendigung der Zementation

Der Stopdruck ist am Ende der Zementation abzulesen. Die Kolonne ist auf einen vorgegebenen Wert zu entlasten (maximal bis auf den hydrostatischen Differenzdruck zwischen Steig- und Ringraum). Bei Dichtheit des Kugelrückschlagventiles kann die Rohrtour völlig entlastet werden. Nach der Zementhärtung (nach etwa 12 bis 48 Stunden) ist mit den Nachfolgearbeiten an der Rohrtour zu beginnen (Dichtheitskontrolle, Aufbohren der UZ-Ausrüstungen u. a.)

### 2.3.1.2. Linierzementation

Unter einer Linierzementation ist die Zementation einer nicht bis übertage hochgezogenen sogenannten verlorenen Rohrtour zu verstehen. Der Liner wird an einem Gestängestrang hängend in das Bohrloch bis zur projektierten Teufe eingebaut und so zementiert. Als Verbindungselement zwischen dem Liner mit dem Gestängestrang dient eine spezielle Zementiertein-

richtung - die Zementiermuffe. Ein Absetzen des Liners unmittelbar nach der Zementation auf die Bohrlochsohle kann infolge des Eigengewichtes des Rohrstranges zum Ausknicken der Rohrtour führen und ist deshalb nur bei kurzen Linern möglich. Der Liner hängt während der Wartezeit auf Zement erhärtung am Gestänge, wenn der Linerkopf nicht mit einem speziellen Linerhänger ausgerüstet ist. Durch diese spezielle Absetzvorrichtung, den Linerhänger, kann der Liner in der vorhergehenden Rohrtour etwa 100 bis 200 m oberhalb des Rohrschuhes der vorhergehenden Rohrtour abgesetzt bzw. eingehängt werden.

Eine verbesserte Ausführung der Zementiermuffe ist die Duo-Muffe. Der Einsatz der Duo-Muffe setzt den Einbau des Liners an einem Gestängestrag mit einheitlichem Innendurchmesser voraus. Zum Lösen des Nachstopfens für den Liner ist ein Gestängestopfen erforderlich. Der Einsatz eines Nachstopfens hat eine wesentliche Qualitätsverbesserung in der Form zur Folge, daß die Mischzonen beim Nachpumpen in der Rohrtour vermieden werden können und somit am Rohrschuh eine qualitative Zementschlämme ansteht. Die Rohrtour (Liner) ist für die Zementationsarbeiten folgendermaßen auszurüsten:

- 1 Rohrschuh mit Führungsbirne
- 1 bis 2 Kugelrückschlagventile
- 1 Zementiermuffe
- div. Rohrzentralisatoren
- Gestänge mit Zementierkopf

Vorteilhaft ist die Bestückung des Liners mit Kratzern.

#### Technologischer Ablauf der Linerzementation

- Spülen der Rohrtour

Die Rohrtour ist nach dem Einbau des Liners nicht weniger als mit dem 2- bis 3fachen Bohrlochvolumen zu spülen, um ein einwandfreies Austragen des restlichen Bohrkleins und der Filterkruste (besonders beim Einsatz von Kratzern) zu gewährleisten. Die beim Auffüllen der Rohrtour auftretenden Lufteinschlüsse in der Spülung sind durch weiteres Einpumpen von Spülung auszukürieren. Die Dichte der eingepumpten Spülung muß der austretenden Spülung entsprechen.

- Vorpumpen der Pufferflüssigkeit

Bei Linerzementationen ist das Setzen von Vorpuffern sehr empfehlenswert, da auf Grund der Konstruktion des kombinierten Rohrstranges (Rohrtour-Gestänge) eine Stopfentrennung nicht möglich ist.

- Anmischen und Einpumpen der Zementschlämme

Das Schlammvolumen ist so zu bemessen, daß die Zementsäule etwa 300 m oberhalb der Zementiermuffe im Ringraum ansteht. Die zusätzliche Sicherheit ist erforderlich, damit sich im Bereich des Linerkopfes qualitativer Zement befindet. Die Mischzonen, die über dem Liner stehen, werden über die Zementiermuffe abgespült und ausgetragen.

- Nachpumpen der 1. Nachpumpmenge

Das Nachpumpen wird mit allen dafür bestimmten Zementieraggregaten vorgenommen. Die 1. Nachpumpmenge entspricht dem theoretischen Innenvolumen des Liners zwischen Rückschlagventil und Zementiermuffe.

Als Nachpumpflüssigkeit wird Spülung mit einer Dichte eingepumpt, die annähernd der der Zementschlämme im Ringraum entspricht, um ein statisches Gleichgewicht zwischen Ring- und Steigraum im Linerbereich herzustellen.

- Lösen des Öffnungsstopfens für die Linermuffe

Nach dem Einbringen der 1. Portion Nachpumpflüssigkeit ist der Öffnungsstopfen zum Betätigen der Zementiermuffe im Gestängezementierkopf zu lösen.

- Nachpumpen der 2. Nachpumpmenge

Das Volumen der 2. Nachpumpmenge entspricht dem theoretischen Innenvolumen des Gestängestranges. Im 2. Nachpumpvorgang wird der Öffnungsstopfen im Gestänge heruntergepumpt. Vor dem Ende des Einpumpens der 2. Portion befindet sich der Öffnungsstopfen unmittelbar über der Schiebehülse der Zementiermuffe.

- Öffnen der Zementiermuffe

Das Öffnen der Zementiermuffe geschieht durch das Aufsetzen des Öffnungsstopfens auf die Schiebehülse. Beim weiteren langsamen Pumpen kommt es zum Druckanstieg. Bei etwa  $50 \text{ kp cm}^{-2}$  scheren die Abscherstifte der Zementiermuffe

ab, die Schiebehülse wird gelöst und gibt die Austrittsöffnungen der Zementiermuffe frei.

- Abspülen des überschüssigen Zementes

Nach der Betätigung der Muffe erfolgt das Abspülen der überschüssigen Zementmenge oberhalb des Linerkopfes, oberhalb der Zementiermuffe. Das Abspülen erfolgt generell rechts herum (Über den Steigraum in den Ringraum) mit dem 1,5-fachen Ringraumvolumen.

- Ende der Zementation

Nach dem Austragen der überschüssigen Zementmenge nach Über- tage beginnt die Wartezeit auf Zementerhärtung. Der Liner bleibt während dieser Zeit am Gestänge hängen. Zum Abschrauben des Gestängestranges vom Liner ist im Bereich der Schraubverbindung der Zementiermuffe durch Entlastung eine Nullspannung einzustellen. Dazu wird vor dem Linereinbau das Eigengewicht des Gestängestranges in der Spülung (sog. Nullpunktbestimmung) ermittelt.

### 2.3.1.3. Sektionszementation

Bei der Sektionszementation handelt es sich um eine besondere Art der Zementation. Während bei der Zweistufenzementation beide Stufen der Rohrtour, verbunden durch die Schiebehülse, gleichzeitig eingebaut werden, erfolgt die Zementation der in zwei Sektionen eingebauten Rohrtour getrennt in zwei verschiedenen Phasen. Der Einbau der Rohrtour in zwei einzelnen Sektionen geschieht aus Gründen der maximalen Auslastung der Zugfestigkeit der Rohre und der Hakenlasten der Bohrtürme.

Die 1. Sektion wird an einem Gestängestrang in das Bohrloch eingebaut und wie ein Liner zementiert. Die Zementiermuffe der 1. Sektion ist mit einem Konus versehen. Nach dem Aushärten des Zementes der 1. Sektion und dem Ausbau des Gestänges wird nach etwa 48 Stunden die 2. Sektion eingebaut und in den Konus der 1. Sektion mit einem speziellen Rohrschuh, dem Nachsetzschuh, eingepaßt.

Die 2. Sektion ist leicht anzuheben, jedoch nicht aus dem Konus herauszufahren. Die 2. Sektion wird nach dem Prinzip einer normalen Einstufen-Stopfenzementation zementiert.



Nach Beendigung der Zementation ist die 2. Sektion wieder in den Konus der unteren Sektion einzufahren, jedoch nicht völlig zu entlasten, um die Rohrtour vor Deformationen durch Ausknicken zu schützen. Die 2. Sektion ist ohne Kugelrückschlagventil ausgerüstet, um nach Beendigung der Zementation und Absetzen der 2. Sektion in den Konus der 1. Sektion durch möglichen Rücklauf eine Dichtheitskontrolle der Steckverbindung zu ermöglichen.

Auf Grund der zunehmenden Bohrlochteufe und der damit verbundenen maximalen Auslastung der zulässigen Einbauteufen der vorhandenen Rohrtouren findet die Sektionszementation immer stärkere Anwendung bei der Zementation von technischen Kolonnen. Ein wesentlicher Mangel dieser Methode liegt in der fehlenden mechanischen und homogenen Verbindung beider Sektionen. Für die Verbindung der beiden Sektionen vor der Zementation wurde ein Nachsetzschieberrohrschuh entwickelt. Seine Aufgabe besteht darin, daß beide Sektionen (auch für Einsatz im unverrohrten Bohrlochabschnitt geeignet) miteinander verschraubt werden. Die Zementation erfolgt über einen Schiebemechanismus im Rohrschuhkörper.

#### 2.3.1.4. Mehrstufenzementation

Die Erschließung immer größerer Bohrlochteufen stellt auch an die Bohrlochzementierung wachsende Anforderungen. Wenn es gilt, dem Problem stark schwankender und wechselhafter Gebirgsdrücke zu begegnen, teufenbedingte hohe Arbeitsdrücke zu reduzieren, dann findet das Mehrstufenzementationsverfahren sein Anwendungsgebiet. Die Mehrstufenzementation charakterisiert eine in mehreren Etappen durchführbare Rohrzementation. Der internationale Stand beschränkt sich hauptsächlich auf Zweistufenzementationen. Auf Drei- und Mehrstufenzementationseinrichtungen wurde bisher verzichtet, da zur Zeit noch nicht die Erfordernis solcher Ausrüstungen besteht und die gestellten Aufgaben mit den bekannten Zweistufenzementationsausrüstungen bewältigt werden konnten. Eine Zweistufenzementation kommt dann zur Anwendung, wenn es gilt

- lange Rohrtouren über ihre gesamte Länge zu zementieren
- den hydrostatischen Druck auf anstehende druckschwache Horizonte zu mindern
- Zementationen in festgelegten Intervallen mit unterschiedlichen Zementrezepturen durchzuführen

Bei der Entwicklung der Zweistufenzementationsausrüstungen wurde darauf Wert gelegt, die Vorteile einer Einstufenzementation auch auf die Zweistufenzementation zu übertragen. Hierzu zählt hauptsächlich der Effekt der Stopfentrennung.

Bei der Zweistufenzementation wird ein spezielles Zwischenstück - Schiebemuffe - auf eine vorher festgelegte Teufe in die Rohrtour eingebaut. Die Konstruktion der Schiebemuffe weist die vielfältigsten Variationsmöglichkeiten auf, die im Kap. 3 Zementationsausrüstungen näher beschrieben werden. Bei der Zweistufenzementation ist zu unterscheiden in

- diskontinuierliche Zweistufenzementation und
- kontinuierliche Zweistufenzementation

In der DDR wurden bisher fast ausschließlich alle Zweistufenzementationen über eine Schiebemuffe nach dem Prinzip der diskontinuierlichen Zweistufenzementation durchgeführt, d. h., die Zementation erfolgte zeitlich getrennt in zwei Stufen. Die überschüssige Zementmenge der 1. Stufe wurde zuerst abgespült, und nach dem Abbinden der 1. Stufe wurde die 2. Stufe zementiert. Dies ist der wesentlichste Unterschied zur kontinuierlichen Zweistufenzementation, bei der die 2. Stufe unmittelbar auf die 1. Stufe zementiert wird.

Die diskontinuierliche Stufenzementation hat in erster Linie zur Aufgabe, den hydrostatischen Druck auf die Formationen zu reduzieren. Sie findet im Gegensatz zum kontinuierlichen Zweistufenzementationsverfahren, das nur eine Senkung des Arbeitsdruckes bewirkt und den Einsatz von verschiedenartig verzögerten und in ihrer Thermostabilität unterschiedlichen Zementrezepturen ermöglicht, die vorrangigste Anwendung.

## Technologischer Ablauf der Zweistufenzementation

### Diskontinuierliches Verfahren

#### - Vorbereitung der Rohrtour

Die Rohrtour ist mit folgenden untertägigen Zementationsausrüstungen zu versehen:

- 1 Rohrschuh mit Führungsbirne
- 1 bis 2 Kugelrückschlagventile
- 1 Schiebemuffe
- div. Rohrzentralisatoren

#### - Spülen der Rohrtour

In bestimmten Intervallen ist die Rohrtour während des Einbaues und nach dem Einbau kontinuierlich zu spülen, um den Einsatz von Kratzern und Zentralisatoren effektiv zu unterstützen und die im Bohrloch befindlichen Festkörperanteile auszutragen.

#### - Vorpumpen einer Pufferflüssigkeit

Das Volumen der Pufferflüssigkeit ist so zu dimensionieren, daß wegen fehlender Stopfentrennung zwischen der Zementschlämme und der Spülung bereits in der Rohrtour die Bildung von Mischzonen reduziert wird.

#### - Anmischen und Einpumpen der Zementschlämme

#### - Nachpumpen der 1. Nachpumpmenge

Als 1. Nachpumpmenge wird das Volumen der Rohre zwischen Stopring und Schiebemuffe berechnet und eingepumpt. Mit der Nachpumpflüssigkeit wird die Zementschlämme direkt ohne Stopfentrennung aus der Rohrtour verdrängt.

#### - Lösen des Öffnungsstopfens

Der Öffnungsstopfen zur Bestätigung der Schiebemuffe wird durch das Herausdrehen der Arretierbolzen am Zementierkopf gelöst und durch langsames Anpumpen in die Rohrtour gedrückt.

#### - Nachpumpen der 2. Nachpumpmenge

Die 2. Portion Nachpumpmenge entspricht dem Rohrvolumen oberhalb der Schiebemuffe bis zum Kolonnenkopf. Durch das Einpumpen dieser 2. Portion wird der Öffnungsstopfen nach unten bewegt, kann aber die Schiebemuffe nicht passieren.

- Öffnen der Schiebemuffe

Durch das Auftreffen des Öffnungsstopfens auf den Sitz der unteren Schiebehülse kommt es zum Druckanstieg. Bei einem Druckaufbau von zusätzlich  $50 \text{ kp/cm}^2$  erfolgt das Abscheren der Scherstifte, und die Schiebehülse gibt die Austrittsöffnungen der Schiebemuffe frei.

- Abspülen des überschüssigen Zementes

Der überschüssige Zement wird über die Öffnungen der Schiebemuffe rechtsherum abgespült. Als Abspülmenge ist minimal das 1,5fache Ringraumvolumen oberhalb der Schiebemuffe zu wählen. Ein Rückfluß der Zementschlämme in die Rohrtour der unteren Stufe wird durch das eingebaute Kugelrückschlagventil bzw. durch die -ventile verhindert. In der Regel wird nach 48 Stunden mit der Zementation der oberen Stufe begonnen, d. h., nachdem der Zementmantel der unteren Stufe abgebunden hat.

- Einpumpen der 2. Portion Zementschlämme

Nach dem Setzen eines Vorpuffers wird die Zementschlämme für die 2. Stufe angemischt und eingepumpt.

- Lösen des Nachstopfens der 2. Stufe

Der Nachstopfen der 2. Stufe erfüllt neben der Trennung zweier Medien voneinander gleichzeitig die Funktion eines Schließstopfens der Schiebemuffe. Er wird durch das Lösen der Arretierung am Zementierkopf freigegeben und nach unten gepumpt.

- Nachpumpen

Der Nachstopfen bzw. Schließstopfen wird mit einer Nachpumpmenge, die dem Volumen der oberen Stufe zwischen Schiebemuffe und Kolonnenkopf entspricht, in die Rohrtour eingepumpt.

- Schließen der Schiebemuffe

Am Ende des Nachpumpvorganges setzt der Schließstopfen auf dem Sitz der oberen Schiebehülse auf. Bei einem Druckanstieg von  $50 \text{ kp cm}^{-2}$  werden die Scherstifte, die die Schiebehülsen halten, abgeschert, und die Schiebehülse schiebt sich über die Öffnungen der Schiebemuffe. Diese werden somit mechanisch abgedichtet, und das einheitlich dicke Gefüge der gesamten Rohrtour wurde wieder hergestellt.

#### - Ende der Zementation

Nach dem Druckanstieg ist der Überlauf eines der Zementieraggregate zu öffnen und der Rücklauf zu kontrollieren. Ist neben dem Entlasten der Rohrtour kein Rücklauf zu verzeichnen, ist die Schiebemuffe dicht.

Anschließend kann eine Belastung der Rohrtour auf einen vorgegebenen Wert erfolgen. Es beginnt eine 48stündige Wartezeit auf Zementerhärtung. Nach 48 Stunden werden die Schiebemuffe, die Stopfen, der Stopring und die Rückschlagventile aufgebohrt. Die Kolonne wird durch Abdrücken auf ihre Dichtigkeit überprüft.

#### Kontinuierliches Verfahren

Der Ablaufplan des kontinuierlichen Zweistufenzementationsverfahrens unterscheidet sich insofern von dem diskontinuierlichen Verfahren, als die 2. Portion Zementschlämme unmittelbar nach der 1. Portion erfolgt. Das bedeutet, daß der überschüssige Zement der 1. Stufe nicht abgespült wird, sondern der Öffnungsstopfen durch die nachfolgende 2. Portion Zementschlämme niedergepumpt wird. Unmittelbar mit dem Öffnen der Schiebemuffe tritt die Zementschlämme in den Ringraum aus. Der Ablauf einer kontinuierlichen Zweistufenzementation läßt sich grob in folgenden Punkten festhalten:

- Vorbereitung der Rohrtour
- Spülen der Rohrtour
- Vorpumpen einer Pufferflüssigkeit
- Einpumpen der Zementschlämme für die 1. Stufe
- Einpumpen der 1. Nachpumpmenge
- Lösen des Öffnungsstopfens
- Einpumpen der Zementschlämme für die 2. Stufe
- Öffnen der Schiebemuffe
- Lösen des Schließstopfens
- Nachpumpen der 2. Nachpumpmenge
- Schließen der Schiebemuffe
- Entlastungen der Leitungen

Wie aus dem Beschriebenen hervorgeht, wird für die Zementation der 2. Stufe kein spezieller Vorstopfen eingesetzt. Der Öffnungsstopfen für die Schiebemuffe dient gleichzeitig als Trennstopfen zwischen der Nachpumpmenge der 1. Stufe und der Zementschlämme der 2. Stufe. Mit dem Öffnen der Schiebemuffe tritt die Zementschlämme in den Ringraum aus.

#### 2.3.1.5. Ringraumzementation

Ringraumzementation zählen mit zu den Ausnahmefällen der Rohr- zementationen. Sie finden nur dann ihre Anwendung, wenn eine normale Rohr- zementation rechtsherum über den Steigraum technisch nicht durchführbar ist. Unter einer Ringraumzementation als Primärzementation ist

- eine Zementation bei geschlossenem Ringraum und offenem Steigraum
- eine Zementation über in den Ringraum eingelassene Fallrohre bei geschlossenem Steigraum

zu verstehen. Von diesen beiden Varianten der Ringraumzementation findet die erste Methode in Form der Linkszementation breite Anwendung. Das Zementieren über Fallrohre bleibt ausnahmslos überdimensional großen Futterrohren (Hilfsstandrohr, Standrohre) mit großem Ringraumspiel vorbehalten.

#### Linkszementation

Das Prinzip der Linkszementation besteht darin, daß der Pumpvorgang beim Zementieren über den Ringraum in den Steigraum

- im Gegensatz zur normalen Stopfenzementation - erfolgt.

Die Linkszementation wird dann angewendet, wenn es gilt, Rohrtouren unter besonders schwierigen Bedingungen zu zementieren. Die Vorteile einer Linkszementation sind:

- Druckschwache Horizonte bzw. Speicherhorizonte werden bei der Zementation weniger belastet. Die hydrodynamischen Druckverluste, die auf das Gebirge übertragen werden, sind wesentlich geringer. Nur die sehr geringen hydrodynamischen Druckverluste des Steigraumes werden auf die Horizonte übertragen.

Dieser Fakt gewinnt bei der Zementation unter engstem Ringraumspiel besondere Bedeutung.

- Hinter den Rohren kann sich ein qualitativ besserer und einheitlicher Zementstein bilden. Die gesamte Zementschlämme wird nicht über den Rohrschuh am Gebirge vorbeigepumpt, d. h., nicht die gesamte Zementschlämme der maximalen Bohrlochtemperatur wird ausgesetzt. Die Abbindezeiten der Zementschlämme können entsprechend der in dem jeweiligen Teufenintervall herrschenden Bohrlochtemperaturen ausgelegt, verzögert werden. Der Abbindeprozeß läßt sich über die gesamte Rohrlänge regulieren. Durch die geringe Kontaktzeit einer geringen Teilmenge der Zementschlämme mit dem offenen Gebirge kann nur dieser Teil der Zementschlämme durch evtl. Laugen, durch Schichtwasser und dergleichen geschädigt werden und nicht das gesamte Volumen.
- Die Zementationszeiten bei der Linkszementation sind weit- aus geringer als bei der Rechtszementation. Das Nachpumpen, das eigentliche Verdrängen der Zementschlämme in den Ringraum, entfällt. Die Zementschlämme wird nur in der geforderten Menge über den Ringraum eingepumpt. Über eine Blende (z. B. Schieber des Zementierkopfes) ist der Arbeitsdruck beim Einpumpen der Zementschlämme über den Ringraum entsprechend zu drosseln (Gegendruck von etwa  $30 \text{ kp cm}^{-2}$ ), um ein Durchfallen der Zementschlämme zu vermeiden.

Der wesentlichste Nachteil dieses Zementationsverfahrens ist, daß der Zementkopf in den Rohren nicht genau bestimmt werden kann (z. B. durch Mengemessungen, Einmessen durch geophysikalische radioaktive Meßmethoden; Druckgleichgewicht zwischen Ring- und Steigraum nur bedingt möglich). Die Größe der Mischzone zwischen Spülung und Zementschlämme läßt sich schwer feststellen. Um am Rohrschuh eine qualitative Zementschlämme anstehen zu haben, sind größere Mengen Zementschlämme (die gesamte Mischzone) in die Rohre zu drücken. Dieser Zementstein ist anschließend aufzubohren. Es wurde eine Reihe von Technologien zur Durchführung der Linkszementation ausgearbeitet, die alle zum Ziel haben, den in der Rohrtour befindlichen Zement bzw. die Mischzone

auf ein Minimum zu reduzieren. Eine Linkszementation ist generell nur dann möglich, wenn die Rohrtour ohne Kugelrückschlagventile eingebaut wurde bzw. über diesen ein zu öffnender Zirkulationsmechanismus (evtl. Schiebemuffe) eingebaut ist.

### 2.3.2. Sekundärzementation

Bei den Sekundärzementationen soll hier nur auf eine Zementationsart - die Druckzementation - besonderer Wert gelegt werden. Alle übrigen Sekundärzementationen dienen hauptsächlich zur Beseitigung eventueller Fehlzementationen und tragen deshalb unterschiedlichen Charakter - ausgehend von der jeweils gegebenen Situation. So können, um ein Beispiel zu nennen, Rohrtouren, bei denen der Zementmantel die projektierte Höhe nicht erreichte, über Perforationen oder im anderen Fall über den Ringraum nachzementiert werden.

#### 2.3.2.1. Druckzementation

Die Aufgabe einer Druckzementation besteht darin, durch das Verpressen von Zementschlämmen Hohlräume, Risse und andere permeable Zonen im verrohrten oder im offenen Gebirge auszufüllen und abzudichten. Durch Druckzementationen können Lecks in der Rohrtour, Zirkulationsverlusthorizonte oder Migrationszonen entsprechend behandelt werden. Druckzementationen finden z. B. bei der Bekämpfung von Laugenzuflüssen und dgl. in Form von Kunststoffverpressungen ein neues Anwendungsgebiet. Zur Durchführung von Druckzementationen steht eine Reihe von speziellen Zementationsausrüstungen, wie Retainer, Zementter, Brückenstopfen, zur Verfügung.

#### Technologischer Ablauf der Druckzementation

##### - Vorbereitung

Die Vorbereitungsarbeiten für eine Druckzementation müssen unter besonderer Sorgfalt durchgeführt werden. Das gesamte Drucksystem ist zu überprüfen und auf seine Einsatzfähigkeit zu kontrollieren. Die Kolbendurchmesser der Hochdruck-



Zementierpumpe sind auf den zu erwartenden Arbeitsdruck auszulegen. Bei Druckzementationen ist prinzipiell ein Druckbandschreiber einzusetzen. Druckzementationen werden in der Regel über Tubinge oder über Gestänge durchgeführt. Aus diesem Grunde ist der Strang vor Beginn der Zementation bis zur Oberkante des zu zementierenden Intervalls einzubauen.

- Absorptionsdruckprobe

Vor jeder Druckzementation ist mit Hilfe einer Absorptionsdruckprobe die Aufnahmefähigkeit des Horizontes bzw. des Intervalles bei entsprechendem Druck zu überprüfen und zu registrieren. Das Verpressen der Absorptionsflüssigkeit erfolgt bei geschlossenem Ringraum. Der anstehende Absorptionsdruck darf den zulässigen Innendruck der Rohrtour nicht überschreiten. Nach 3 bis 4 Minuten ist die Leitung zu entlasten und die Rücklaufmenge zu messen.

- Anmischen und Einpumpen der Zementschlämme

Die Schlämme ist nach den vorgegebenen Parametern anzumischen. Das erforderliche Schlammvolumen liegt in der Regel zwischen 1 bis 5 m<sup>3</sup> und wird im wesentlichen von der Aufnahmefähigkeit des Horizontes bestimmt. Die Zementschlämme wird bei offenem Ringraum über den Tubing- bzw. Gestängestrang eingepumpt.

- Nachpumpen

Die Zementschlämme wird durch das Einpumpen der Nachpumpflüssigkeit aus dem Strang verdrängt. Es ist eine solche Menge nachzupumpen, daß die Höhe des Spiegels der Zementschlämme im Ringraum mit dem der im Steigraum übereinstimmt.

- Ausbau des Stranges

Der gesamte Strang ist um einen Sicherheitsabstand von etwa 100 m über der im Bohrloch stehenden Zementschlämme anzuheben. Dieser Abstand ist aus Gründen der Sicherheit (Verhindern des Einzementierens des Stranges) unbedingt einzuhalten.

- Verpressen

Der Ringraum ist zu schließen, und das Verpressen erfolgt über den Steigraum (ggf. gleichzeitig auch über den Ringraum). Die Flüssigkeitsmenge zum Verpressen der Zementschlämme in den Horizont darf hierbei maximal das Volumen

dieser Zementschlämme nicht überschreiten. Es ist nur das Volumen übertage einzupumpen, das der Horizont aufnehmen soll. Der Druck beim Verpressen soll den Absorptionsdruck, auf keinen Fall aber den kritischen Innendruck der Rohrtour überschreiten. In gegebenem Fall ist der Verpreßvorgang abubrechen.

- Ende der Druckzementation

Nach Beendigung der Verpreßarbeiten sind Ring- und Steigraum zu schließen. Der anstehende Verpreßdruck ist nicht abzulassen. Eine Entlastung der Rohrtour erfolgt erst nach dem Abbinden des Zementes. Schlußfolgernd aus dem technologischen Ablaufplan ist eine Grundvoraussetzung für das Gelingen von Druckzementationen, daß das zu behandelnde Intervall von anderen unter oder über ihm lagernden druckschwachen Horizonten isoliert ist. Um ein Verpressen der Zementschlämme in untere aufnahmefähige Schichten oder ins offene Bohrloch zu unterbinden, ist der zu behandelnde Horizont durch eine Zementbrücke abzugrenzen. Eine mechanische Absperrung des zu zementierenden Intervalles nach oben ist durch Retainer bzw. Zementer anzustreben.

### 2.3.3. Setzen von Zementbrücken

Beim Setzen von Zementbrücken handelt es sich um eine Art Gestängezementation (über Gestänge oder Tubinge). Zementbrücken können aus den verschiedensten Gründen im offenen als auch im verrohrten Bohrloch gesetzt werden.

Dies können sein:

#### 1. Brücken für Teste

Diese werden notwendig,

- wenn verschiedene Horizonte voneinander abgeriegelt werden müssen
- wenn Stützanker auf ihnen abgesetzt werden müssen
- wenn es nicht möglich ist, einen Gummipacker zu verwenden

#### 2. Brücken für Ablenkungen

3. Brücken als Sperren im Bohrloch für Druckzementationen, für Isolation druckschwacher Horizonte, als künstliche Bohrlochsohle für Verrohrungsarbeiten
4. Brücken zur Konservierung der Bohrung

#### Technologischer Ablauf der Brückenzementation

##### - Vorbereitung

Einzubauen sind nur Gestänge bzw. Tubinge mit kalibriertem Innendurchmesser. Dieser Strang ist bis zur Unterkante der zu setzenden Brücke einzufahren. Vor Zementationsbeginn ist der Strang zu manövrieren und Zirkulation zu pumpen, um das Freisein des Stranges zu kontrollieren. Außerdem dient es dazu, sich von der erforderlichen einheitlichen Dichte der Spülung im gesamten Bohrloch (Ringraum und Steigraum) zu überzeugen.

##### - Anmischen und Einpumpen der Zementschlämme

Das Zementieraggregat bzw. die -aggregate werden über einen Tubinganschlußkopf oder einen Gestängezementierkopf mit dem eingebauten Strang verbunden. Das benötigte Schlammvolumen zum Setzen von Zementbrücken schwankt in den Bereichen zwischen  $1,5$  bis  $5 \text{ m}^3$ , in Einzelfällen auch darüber. Die Zementschlämme kann aus Gründen einer genaueren Dosierung und einer einheitlichen Dichte über Behälter angemischt werden.

##### - Nachpumpen

Als Nachpumpmenge gilt das Volumen des Tubinge- bzw. Gestängestranges von Oberkante der Zementbrücke bis über-tage. Es ist zweckmäßig, nach dem Einbringen der Nachpumpmenge den Überlauf am Zementieraggregat kurz zu öffnen, um den Gleichgewichtszustand zwischen Ring- und Steigraum zu korrigieren. Zur Trennung der Zementschlämme von der Spülung und zur Vermeidung von Mischzonen sind Puffer (Wasser) oder Gestängestopfen einzusetzen.

##### - Ausbau und Abspülen

Die Tubinge bzw. das Gestänge ist unmittelbar nach dem Nachpumpen bis zur projektierten Oberkante der Zementbrücke langsam auszubauen. Dabei ist darauf zu achten, daß durch einen zu schnellen Ausbau ein "Hochreißen" der Ze-

mentschlämme vermieden wird. Die überschüssige Zementmenge ist links herum mit dem anderthalbfachen Steigraumvolumen abzuspülen. Die beim Abspülen der Zementbrücke aus dem Bohrloch austretende Menge von Zementschlämme ist zu messen. Die Differenz zur eingepumpten Menge gibt Rückschlüsse darüber, wieviel Zementschlämme in der Bohrung verblieben ist. Aus Sicherheitsgründen ist der Strang nach dem Abspülen ganz, aber mindestens jedoch um etwa 100 m auszubauen, um so eine ausreichende Sicherheitszone zwischen Zementbrücke und Gestängestrag zu schaffen und ein Festzementieren des Stranges zu vermeiden. Das Bohrloch ist 48 Stunden nach dem Setzen der Zementbrücke nicht zu befahren. Bei Brücken, die zur Ablenkung dienen, ist die Wartezeit auf Zementerhärtung auf mindestens 72 Stunden festzulegen. Gewisse Schwierigkeiten bereitet das Setzen von Zementbrücken in einem engbegrenzten Teufenbereich. Zementbrücken sind nach dem Abtasten oftmals gar nicht oder aber in größerer Teufe anzutreffen, d. h., sie fallen durch.

Für das Absacken gibt es zwei Ursachen. Einmal, wenn unterhalb der Zementbrücke druckschwache Schichten anstehen (Spülverlust), und zum anderen, wenn unterhalb der Zementschlämme sich ein Bohrlochmedium geringer Viskosität (z. B. Wasser) befindet.

Hier kann es passieren, daß die Brücke "durchtropft". Im ersten Fall ist der Spülverlust zu beseitigen oder der druckschwache Horizont nur gering zu belasten (geringmächtige Brücken).

Im zweiten Fall ist unterhalb der Zementbrücke eine Spülungsbrücke aus hochviskoser Spülung mit hoher Thixotropie zu setzen. Ein Vor- und Nachpuffer von 1 bis 2 m<sup>3</sup> Pufferflüssigkeit ist völlig ausreichend, um die Vermischung der Zementschlämme mit der Bohrlochspülung zu vermeiden. Zum Setzen von Zementbrücken in einer vorgegebenen Teufe wurden Manschetten und Brückenstopfen entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

#### 2.3.4. Bohrlochverfüllungen

Bohrlochverfüllungen sind ein spezielles Anwendungsgebiet der Gestängezementation. Das Verfüllen von niedergebrachten Bohrungen geschieht in der Weise, daß das Bohrloch von Sohle aufwärts mit Zementschlämme aufgefüllt wird. Ein Gestänge- bzw. Tubingstrang ist bis zur Endteufe der Bohrung einzubauen, und über diesem wird die Zementtrübe eingepumpt. Die verdrängte Spülung tritt über dem Ringraum übertage aus. Die Bohrungen können nach zwei Verfahrensweisen verfüllt werden:

1. Die im Bohrloch vorhandene Spülung wird von Sohle bis übertage durch Zementschlämme ausgewechselt. Um hierbei den Gestängestrang nicht einzuzementieren, ist nach jedem Zementationsintervall von 150 bis 200 m (je nach Anlagenkapazität) der Strang um diese Länge anzuheben und somit stufenweise auszubauen. Im Sonderfall kann die im Bohrloch befindliche Spülung in einen unteren offenen Horizont durch die übertage eingepumpten Zementschlämme verpreßt werden. Diese Variante des Verfüllens ist nur in solchen Fällen vorzunehmen, in denen ein Einbau des Gestänges oder der Tubinge nicht möglich ist und im unteren Profil der Bohrung ein aufnahmefähiger Horizont ansteht.
2. Das Bohrloch wird durch einzelne Zementbrücken in festgelegten Abständen abgesichert. Die Mächtigkeit solcher Brücken liegt gewöhnlich in der Größenordnung von 50 bis 70 m. Sie sind nur mit sulfatresistentem Portlandzement zu setzen. Zwischen den Zementbrücken wird die Bohrung mit anderen Materialien verfüllt. Dies sind oftmals ausgesalzene, beschwerte Spülungen.

#### 2.4. Vorbereitung der Zementation

Die Vorbereitungsmaßnahmen für Zementagearbeiten gliedern sich in zwei Hauptgebiete:

- a) organisatorisch-technologische Vorbereitungsarbeiten
- b) technische Überprüfung zur Ermittlung der Einsatzfähigkeit des Geräteparkes

Vor jeder Zementation ist ein Arbeitsplan aufzustellen, der die durchzuführende Arbeit in ihren einzelnen Punkten zum Inhalt haben muß. Nur ein genau detaillierter Arbeitsplan, eine klare Vorstellung über auszuführende Arbeitsoperationen garantiert einen guten organisatorischen und technologischen Ablauf der Zementation.

Der Arbeitsplan für die Zementation beinhaltet:  
alle zum Einsatz kommenden Geräte und Materialien nach Art und Menge, wie

- Zusammensetzung der Zementrezeptur
- Anzahl der benötigten Zementieraggregate, Mischmaschinen und Zementtransporter
- erforderliche Zementageausrüstung, wie Zementierkopf, Stopfen, HD-Schieber, Verteilerstücke, Meßgeräte, UZ-Materialien, Behälter
- Menge an Anmischwasser und Nachpumpmenge mit Güteangabe

An Hand der erhaltenen Ausgangsdaten bei der Auftragserteilung zur Zementation, wie

- Bohrlochdurchmesser laut Kaliberkurve
- Dimension der Rohrtour mit Wanddicke
- Einbauteufe
- Höhe des Stopüberganges
- Druck-, Verlust- und Fracgradienten
- Dichte der im Bohrloch befindlichen Spülung
- Dichte der Nachpumpmenge
- Angaben zur Geologie des Bohrlochprofils

werden

- das Volumen der benötigten Zementschlämme
- Trockenmenge des Zementationsmaterials
- Menge des Anmischwassers
- erforderliche Nachpumpmenge
- Druckberechnung
- Zementationsdauer und Pumpregime

errechnet und wird der technologische Ablaufplan erarbeitet sowie eine Laboranalyse über die einzusetzende Zementrezeptur gefahren. Die Analysenwerte der Laborprüfung der Zementre-

zeptur weisen die Zusammensetzung der Rezeptur nach Gewichtsanteilen, ihre Dichte, ihr W:F-Verhältnis, den Fließkegel, die Thermostabilität, die Festigkeitsentwicklung, das Sedimentationsverhalten, das Abbindeverhalten unter Bohrlochbedingungen sowie Art und Menge der Zusätze zur Regulierung der Parameter der Zementschlämme aus. Bei der Durchführung der Zementationsarbeiten kommt es darauf an, die Projekt- und Analysenwerte voll in der Praxis durchzusetzen. Für das Gelingen der Zementationsarbeit ist eine gründliche Vorbereitung des Bohrloches zum Rohreinbau und zur Zementation Grundvoraussetzung. Die Qualität des Bohrloches und des Rohreinbaues (Qualität der Spülung, Beherrschung der bohrtechnischen Schwierigkeiten, Belastbarkeit des Bohrloches, zentrischer Einbau der Rohrtour u. a.) beeinflussen direkt die Qualität der Zementationsarbeiten. Zu einem kontinuierlichen Arbeitsprozeß gehört die zuverlässige Funktionstüchtigkeit und Sicherheit aller eingesetzten Aggregate und Ausrüstungen. Wesentlichen Anteil an einer qualitätsgerechten Zementation hat die einzusetzende Zementrezeptur, die ihrerseits in ihrer Qualität von der richtigen Zusammensetzung und dem Anmischprozeß im Bohrfeld bestimmt wird.

## 2.5. Anmischen der Zementschlämme

Der Anmischprozeß zur Herstellung der Zementschlämme erfolgt dadurch, daß dem trockenen Zement eine bestimmte Menge Wasser zugegeben wird. Zu diesem Zweck saugt ein Zementieraggregat mit einer speziell für diese Aufgabe montierte Dreiplungerpumpe das Anmischwasser aus dem Saugbehälter des Zementieraggregates und drückt es über eine Schlauchverbindung in den hydraulischen Mischer der Mischmaschine. Der maximale Wasserdruck wurde auf 15 at festgelegt. Über eine Düse strömt das Wasser in das Abflußrohr und aus diesem in den Saugbottich. Durch das Öffnen des Schiebers am Mischerkasten und die Betätigung der Förderschnecken wird das Zementationsmaterial aus dem Bunker zum hydraulischen Mischer der Mischmaschine transportiert und dort mit dem Wasser vermischt. Durch das Abflußrohr strömt die Zementschlämme in den Saugbottich

und wird aus diesem über den Saugschlauch der angeschlossenen HD-Pumpe der Zementieraggregate in das Manifold und dann in das Bohrloch gepumpt. Die Förderleistung der Mischmaschine wird entscheidend durch die Fördermenge der Plungerpumpe, der Wahl des Düsendurchmessers und somit des Arbeitsdruckes bestimmt. Einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität der herzustellenden Zementschlämme übt die Konstruktion des hydraulischen Mischers der Mischmaschine aus. Sie beeinflusst entscheidend den Benetzungsgrad der Zementpartikelchen mit Wasser und den Durchlüftungsgrad der Zementschlämme. Die Dimension und die Form der Düsen ist so zu wählen, daß eine optimale Benetzung unter Berücksichtigung eines hohen Arbeitsdruckes gegeben ist. Im Ausflußrohr wird die Zementschlämme durch ein optimales Fließregime zusätzlich gemischt, z. B. durch Änderung der Strömungsrichtung. Ein Mitreißen von Luft durch die Zementschlämme führt zu ihrer Durchgasung und zur Qualitätsminderung. Die Fallhöhe vom Ausflußrohr zum Saugbottich ist hierbei neben der Dichtheit des hydraulischen Mischers der Mischmaschine zu berücksichtigen. Die Qualität der Zementschlämme kann durch einen weiteren Mischprozeß weitgehend verbessert werden. Bei dieser Methode handelt es sich um die sogenannte "verzögerte Mischtechnologie".

#### 2.5.1. Verzögerte Mischtechnologie

Das Prinzip der verzögerten Mischtechnologie (s. Bild 3) besteht darin, daß die angemischte Zementschlämme aus dem Saugbottich in einen Behälter von etwa  $20 \text{ m}^3$ , dem Nachmischaggregat, gepumpt wird. Im Nachmischaggregat erfolgt die Sekundärmischung durch intensives Umwirbeln der Zementschlämme mittels zweier Rührwerke. Durch das intensive Umwirbeln der Zementschlämme werden die Zementpartikelchen besser benetzt, eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften (Senkung der Viskosität) ist die Folge. Dieses bewirkt andererseits einen qualitativ besseren Zementstein bezüglich seiner Festigkeit und Dichtheit. Der Einsatz von mechanischen Rührwerken ist in jedem Fall bei viskosen und schwer verpumpbaren Zementschlämmen sowie beim Einsatz von Gemi-



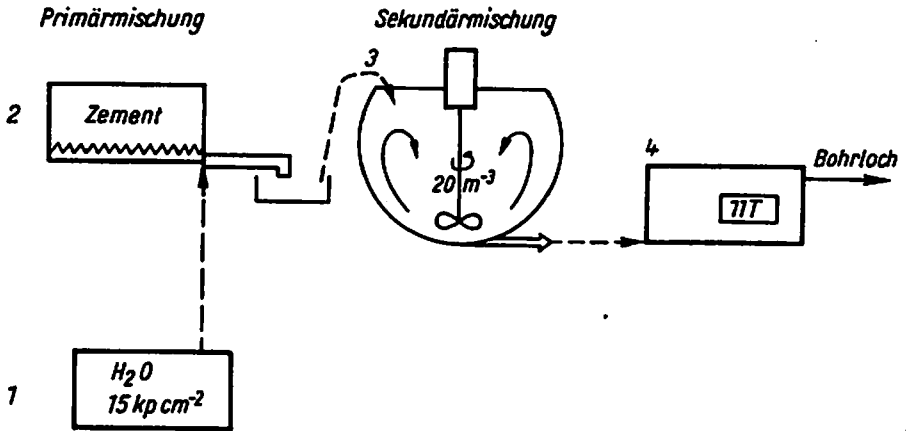


Bild 3. Prinzip der verzögerten Mischtechnologie

1 Anmischfahrzeug 3 W 1 3 Nachmischaggregat  
 2 Mischmaschine 2 SMN 20 4 Leistungsstarkes 3 ZA 400 A

schen aller Art (Schlacke, Quarzmehl, Flugasche, Bentonit und beschwerte Zemente) vorzusehen. Der Einsatz von Nachmischaggregaten zur Zementation von technischen und Produktionsrohrturen ist Bestandteil der Zementationstechnologie.

Die Anwendung der verzögerten Mischtechnologie wirkt sich unmittelbar positiv auf den Zementationsprozeß aus. Die wesentlichen Beweggründe für die verzögerte Mischtechnologie sind

- a) qualitative und homogene Eigenschaften der Schlämme
  - einheitliche Dichte des gesamten Schlammvolumens
  - Entlüften der Zementschlämme
  - niedrigere Viskosität der Zementschlämme beim Einpumpen
  - gleichmäßiger Anteil von Zusätzen in der Schlämme
  - qualitativ hochwertiger Zementstein
- b) gute Meß- und Kontrollmöglichkeit
  - die Parameter der Zementschlämme können durch den Anschluß von Meßgeräten erfaßt und aufgezeichnet werden
  - das Volumen der eingesetzten Zementschlämme ist genau registrierbar

### c) störfreies Einpumpen der Zementschlämme

Das Einpumpen der Zementschlämme in das Bohrloch kann organisatorisch leichter und übersichtlicher gestaltet werden. Ein Ausfall von einem Zementieraggregat führt nicht zu wesentlichen Komplikationen, da in diesem Falle eine leichtere Umdisponierung ohne merklichen Einfluß auf das Einpumpen möglich ist. Das Einpumpen der Zementschlämme erfolgt mit erhöhter Sicherheit, und das Einpumpen selbst ist als separate Arbeitsoperation zu betrachten.

### 2.5.2. Anmischen unter Einsatz leistungsstarker Zementieraggregate

In dem Fall, wo die Zementationsarbeiten ausschließlich mit den Zementieraggregaten vom Typ 3 ZA 400 A durchgeführt werden, sind spezielle Aggregate zum Anmischen der Zementschlämme einzusetzen, da dieser Typ von Zementieraggregaten nicht mit Anmischpumpen ausgestattet ist. Es empfiehlt sich, den Aufbau der Gruppen zum Anmischen der Zementschlämme so zu gestalten, daß je ein ZA vom Typ ZA 320 M und ein 3 ZA 400 A zusammenarbeiten. Durch den Einsatz von speziellen Mischfahrzeugen, ausgerüstet mit drei Plungerpumpen vom Typ W 1 oder mit leistungsfähigen Kreiselpumpen, läßt sich der Anmischprozeß rationeller durchführen. Von diesem Anmischfahrzeug wird das Anmischwasser direkt in den hydraulischen Mischer der Mischmaschine gedrückt.

### 2.6. Qualitätsbestimmung von Rohrzementationen

In der Bohrpraxis kamen bisher die verschiedensten Bohrlochkonstruktionen zur Anwendung. Ziel und Zweck sämtlicher eingebauter und zementierter Futterrohrkolonnen sind neben der festen Verankerung der Rohrtour eine hermetische Isolierung der erdöl- und erdgasführenden Schichten untereinander und zu anderen Migrationshorizonten. Die Zementation von Futterrohrtouren soll ferner garantieren, daß ein gasdichter Abschluß im Ringraum hergestellt wird und einem Ausbruch von Erdöl- und Erdgas über den Ringraum entgegenwirkt. Es kommt

also bei einer Zementation nicht darauf an, daß der Zement den Ringraum vollständig ausfüllt, sondern daß er auch eine gute Bindung zu dem Gebirge und der Kolonne aufweist. Für die Aufstellung bestimmter Qualitätskriterien einer Zementation, wie

- erreichte Zementkopfhöhe
- Bindung zur Kolonne und zum Gebirge
- Dichtheit

wurden entsprechende Kontrollmöglichkeiten in Form verschiedener Meßmethoden entwickelt und eingesetzt.

## 2.6.1. Methoden zur Zementkopfbestimmung

### Temperaturmessung

Eines der ältesten und oft praktizierten Verfahren zur Bestimmung der Zementkopfhöhe nach erfolgter Zementation ist die Temperaturmessung. Das Meßprinzip dieser Verfahrens beruht darauf, die unterschiedlichen Temperaturen zwischen dem zementierten und unzementierten Bereich zu registrieren. Durch die freiwerdende Abbindewärme des Zementes steigt die Temperatur der in der Rohrtour befindlichen Spülung um etwa 1 bis 3 °C im zementierten Bereich an. Diese Temperaturzunahme wird mit Hilfe eines Widerstandsthermometers gemessen und in Form einer teufenabhängigen Temperaturkurve aufgezeichnet. Die Nachteile dieser Methode sind, daß

- die Temperaturmessungen nicht wiederholbar sind, da mit zunehmendem Zeitunterschied der Abbindewärme abgeleitet wird
- die Messungen oft negativ durch die ansteigende und stark differenzierte Gebirgstemperatur beeinflusst werden
- infolge der geringen Abbindewärme von zementarmen Gemischen eine Temperaturzunahme nur schwerlich erkennbar ist

### Zementlog

Ein weitaus aussagekräftigeres Verfahren zur Bestimmung der Zementkopfhöhe und der Haftfähigkeiten des Zementmantels an

die Rohrtour ist das Zementlog. Der Aufbau und die Verfahrensweise des Zementlogs ist ähnlich dem des Akustiklogs. Von einem in das Bohrloch hinabgelassenen Ultraschallsender werden Akustikimpulse radial über die Bohrlochspülung, über die Verrohrung und den Zementmantel in das Gebirge abgestrahlt. Die reflektierten Wellen erzeugen mechanische Schwingungen, die in elektrische Spannungen umgewandelt werden und verstärkt über ein Meßkabel auf ein Registriergerät nach übertage gegeben werden. Im zementierten Bereich mit guter Bindung ist infolge der Dämpfung eine starke Energieabnahme des Rohrsignals zu verzeichnen. Das Zementlog läßt keine Schlüsse auf die Permeabilität des Zementsteines zu, da Hohlräume im Zementmantel nicht gedeutet werden können. Es dient zum Nachweis von Zement und seiner Bindung zu den Futterrohren.

#### Radioaktive Markierung des Zementes

Der Einsatz von radioaktiven Präparaten im Bohrfeld hat sich in den letzten Jahren bewährt. Es bestehen zwei Möglichkeiten zur Aktivierung der Zementschlämme:

- die gesamte Zementschlämme wird durch kurzlebige Radioisotopen aktiviert
- nur eine Teilmenge der Zementschlämme wird durch den Zusatz von Radioisotopen markiert, z. B. die Grenze zwischen Spülung und Zementschlämme, d. h. der Zementkopf

Die Aktivierung des Zementes durch Radioisotope ist besonders bei Sekundärzementationen erfolgversprechend. Hierbei kann der Migrationsweg der Zementschlämme hinter den Rohren oder aber auch im Gebirge mittels anschließender Gammamessung verfolgt werden. Die Gammamessung erlaubt es, die Verteilung des Zementes im Ringraum sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ebene zu untersuchen.

## 2.6.2. Dichtheitsprüfung

### Druckprobe

Bei der Druckprobe handelt es sich um ein verbreitetes Verfahren zur Dichtheitsbestimmung nach erfolgter Zementation. Die Durchführung der Druckprobe ist zeitlich nicht begrenzt. Sie erfolgt in der Regel 2 bis 3 Tage nach der Zementation. Der erforderliche Prüfdruck ist abhängig vom jeweils zulässigen und zu erwartenden Innendruck der Futterrohre, wird also von der Qualität, der Wanddicke und dem Durchmesser der Futterrohre bestimmt. In der Regel hat die Höhe des Prüfdruckes bei technischen Rohrtouren das 1,2fache des hydrostatischen Druckes bzw. bei Produktionsrohr Touren des Lagerstättendrucks zu betragen. Eine Druckprobe mit solchen extrem hohen Prüfdrücken setzt eine absolute Dichtheit des hydraulischen Drucksystems des Manifolds voraus. Die Dichtheitsprüfung der Futterrohre durch Abdrücken der zementierten Rohrtour führt bei den hohen Prüfdrücken zur Zerstörung der Bindung Zementstein/Rohrtour. Der Zementstein hält im abgebundenen Zustand nur geringfügigen Belastungen von etwa 30 bis 50 kp cm<sup>-2</sup> stand. Es ist deshalb anzustreben, nur die unazementierten Bereiche der Rohrtour, d. h. die Rohrtour nur oberhalb des Zementkopfes über Futterrohrpacker, auf Dichtheit abzudrücken. Dies ist als ausreichend zu erachten, da die Rohre vor ihrem Einbau übertage abgedrückt werden. Wird eine Undichtheit der zementierten Rohrtour festgestellt, dann ist diese im seltensten Falle erfolgreich durch Sekundärmaßnahmen abzudichten.

## 2.7. Ursachen von Fehlzementationen und Maßnahmen zu ihrer Verhütung

Wie an anderer Stelle schon erwähnt, ist die Rohr zementation ein einmaliger, nicht wiederholbarer Arbeitsprozeß. Zeigt es sich, daß die durchgeführte Zementation nicht den erwarteten Qualitätskriterien gerecht wird, dann ist in einigen Fällen eine Nachzementation (Sekundärzementation) unumgänglich. Diese Reparaturzementationen sind mit erheblichen Mehrkosten verbunden und verzögern die anschließenden Arbeiten am Bohr-

loch um ein beträchtliches. Als Fehlzementationen sind solche Zementationen zu bezeichnen, in deren Ergebnis die Qualitätskriterien für die Zementation nicht bzw. nur in einem geringen Maße erfüllt werden. Eine Zementation ist zu beurteilen nach

1. der tatsächlich erreichten Höhe der projektierten Zementsäule
2. der Dichtigkeit des zementierten Intervalls
3. der erzielten Festigkeit des Zementmantels

Durch eingehende Analysen der aufgetretenen Fehlzementationen können die Ursachen für solche mangelhaften Zementationen festgestellt werden. Sind die Ursachen für Fehlzementationen hinreichend bekannt, werden entsprechende Vorbeugungs- bzw. Gegenmaßnahmen getroffen.

#### Zu 1.

Vorhandene Zirkulationsverlusthorizonte bilden die Hauptursache für das Nichterreichen der projektierten Zementkopfhöhe. Druckschwache Horizonte sind deshalb vor der Zementation genau zu lokalisieren und zu analysieren. Je nach ihren Eigenschaften sind der Zementschlämme dämmende Füllstoffe in Form von Sägespänen, Hobelspänen, Zellophanschnitzeln beizugeben. Die Aufstiegsgeschwindigkeit ist geringzuhalten, um den Horizont nicht zusätzlichen dynamischen Brüchen auszusetzen. Es ist empfehlenswert, bei der Berechnung der Zementschlämme einen gewissen Verlustfaktor mit einzukalkulieren. Die bewährteste Methode für eine anschließende qualitätsgerechte Rohrzementation ist, den Horizont vor der Rohrzementation entsprechend vorzubehandeln und notfalls durch eine Druckzementation abzudichten. Dies reduziert weitestgehend die Möglichkeit einer Nachzementation des Ringraumes infolge Nichterreichens der projektierten Zementkopfhöhe.

#### Frühzeitiges Abbinden der Zementschlämme

Durch ein frühzeitiges Abbinden bzw. durch eine schnell ansteigende Konsistenz der Zementschlämme ist ein Verpressen der Zementschlämme in den Ringraum nicht mehr voll gewährleistet, und

der Zementkopf erreicht nicht die vorgegebene Höhe. Die Abbindezeiten der Zementschlämme sind so zu wählen, daß sie um mindestens 25% über der errechneten Zementationsdauer liegen. Während dieser Zeitspanne muß die Zementschlämme noch gut verpumpbar sein. Zur Zementationsdauer zählt die Zeit des Einpumpens, des StopfenlöSENS und des Nachpumpens, d. h. des Verpressens der Zementschlämme in den Ringraum. Um ein plötzliches und frühzeitiges Abbinden des Zementes durch Laugenzuflüsse, Salz und andere chemisch-aktive Stoffe zu verhindern, ist die im Bohrloch befindliche Flüssigkeit sowie das Anmischwasser genau zu analysieren und die Zementschlämme, falls erforderlich, zu schützen. Ferner kann es zum Festwerden der Zementschlämme führen, wenn Wasser aus der Zementschlämme ausfiltriert und, bedingt durch einen hohen Differenzdruck (Zementsäule, Gebirge), in hochpermeable Horizonte abgepreßt wird. Ein schnelles Eindicken der Zementschlämme führt zum Abbruch des Pumpprozesses. Dieser Effekt wird durch Schlämmen mit hoher Wasserabgabe und durch eine niedrige Aufstiegs geschwindigkeit unter hohen Differenzdrücken - Gebirge/Bohrloch - begünstigt.

#### Störungen im Arbeitsablauf

Ein nicht unwesentlicher Faktor für erfolgreiche Rohrzementationen ist ein ununterbrochener, kontinuierlicher Ablauf der Zementation nach Arbeitsplan. Müssen die Zementarbeiten während des Zementationsprozesses, d. h. während der eigentlichen Zementationszeit, infolge zu hoher Arbeitsdrücke oder technischen Ausfalls der Zementiereinrichtungen vorzeitig abgebrochen oder unterbrochen werden, so ist der Erfolg der Zementation von vornherein in Frage gestellt.

#### Fehlende Festigkeit des Zementsteines

Eine weitere Ursache für das Nichterreichen der projektierten Zementkopfhöhe im Ringraum kann in der Planung und Durchführung der Zementationsarbeiten liegen. Durch den Einsatz ungeeigneter Zementrezepturen ist es möglich, daß unter fehlenden Temperaturbedingungen bzw. bei großer Mischzonenbildung auf Grund der angewandten Technologie die geforderten

Festigkeitswerte des Zementsteines nicht über das gesamte Zementationsintervall erbracht werden.

## Zu 2.

Die Dichtheit des Zementmantels über seine gesamte Länge ist ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der Zementation. Es kommt nicht nur darauf an, daß der Ringraum hinter der Rohrtour völlig mit Zement ausgefüllt ist. Das Ziel einer Zementation besteht vielmehr in einer undurchlässigen Isolierung der anstehenden Formationen untereinander und nach Überlagerung. Die Zementation hat zur Aufgabe, jegliche Migration von Gasen oder Flüssigkeiten im Ringraum zu unterbinden.

Eine Methode zur Dichtheitsbestimmung der Zementation ist die Druckprobe. Sie liefert keine Aussage über die Permeabilität des gesamten zementierten Intervalls. Die Durchlässigkeit des Zementmantels im Ringraum ist zurückzuführen z. B. auf die Kanalbildung des Zementes in der Spülung,

- kein Aushärten der Zementschlämme
- große Mischzonen zwischen dem Zement und der Spülung
- Zufluß von Gasen, Laugen oder Schichtwasser

## Kanalbildung

Die Kanalbildung ist eine der Hauptursachen für einen durchlässigen Zementmantel hinter den Rohren. Eine Kanalbildung liegt vor, wenn die Zementschlämme die Spülung nicht völlig aus dem Ringraum verdrängt, die Rohrtour nicht allseitig umgibt und sich nur in Form von Kanälen durch die Spülung zieht. Es kann auch von Kanalbildung gesprochen werden,

wenn der Anteil des Zementes im Ringraum weit über dem der Spülung liegt, der Zementstein aber Spülungseinschlüsse in Form von Schlieren aufweist. Die Kanalbildung hat einerseits ihre Ursache in den vorhandenen rheologischen Parametern der Bohrlochspülung und der Zementschlämme und dem Fließregime der Flüssigkeiten im Ringraum.

Das Ausmaß der Kanalbildung im Ringraum wird weitestgehend von der Lage der Rohre im Bohrloch - von der Geometrie des Ringraumes - bestimmt. Bei Exzentrizität des Rohrstranges im Bohr-



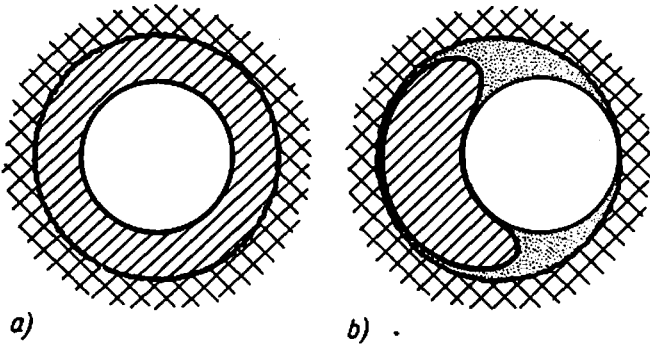


Bild 4. Lage der Rohre im Bohrlochquerschnitt  
 a) konzentrische Lage  
 b) exzentrische Lage der Rohre

loch ist eine Kanalbildung trotz Anwendung aller möglichen Maßnahmen zur Verbesserung des Verdrängungsregimes unvermeidlich.

Durch die exzentrische Lage der Rohre im Bohrloch (durch fehlende Zentrierungseinrichtungen, große Neigung des Bohrloches u. a.) kann sich kein einheitlicher Zementmantel um die Futterrohre ausbilden. Das entscheidendste Qualitätskriterium der Zementation ist der im Ringraum erreichte Verdrängungsgrad, wobei eine vollständige Verdrängung der Spülung durch die Zementschlämme technisch nicht realisierbar ist. Das Verdrängungsregime im Ringraum ist bei der Zementationsvorbereitung so auszulegen, daß eine maximale Verdrängung erreicht wird. Der erreichte Verdrängungsgrad bei der Zementation wird im wesentlichen vom Fließprofil (s. Bild 5) bestimmt, daß durch das Verhältnis der Maximalgeschwindigkeit einzelner Flüssigkeitsteilchen zur Durchschnittsgeschwindigkeit der gesamten Flüssigkeitsmenge charakterisiert wird. In Abhängigkeit vom Fließprofil wird unterschieden in turbulenten Fluß, laminaren Fluß und Pfropfenfluß. Unterscheidungskriterium ist die Aufstiegsgeschwindigkeit.

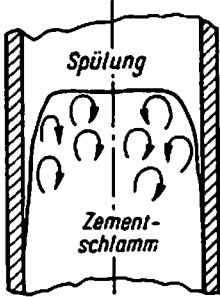
Die Fließgeschwindigkeit für jedes Regime ist in Abhängigkeit von den rheologischen Parametern (Viskosität, Fließgrenze), der Dichte und der Geometrie des Strömungsquerschnittes zu ermitteln. Für Zementationsarbeiten ist nach

Bild 5

Fließprofile bei Zementationsarbeiten

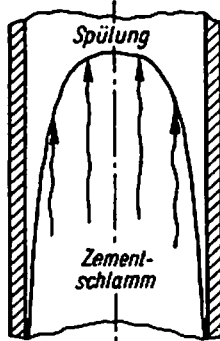
a) turbulentes Störungsprofil

- stark bewegt (wirbelnde Aufstiegs-  
geschwindigkeit)
- gerade Verdrängungsfront
- maximale Fließgeschwindigkeit über  
den gesamten Querschnitt  $V > V_{krit}$
- 90 bis 95% Verdrängung
- Waschwirkung an den Grenzflächen



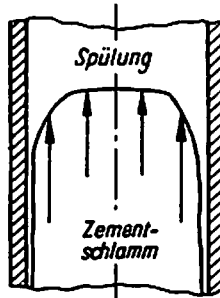
b) laminares Störungsprofil

- ruhiger Fluß, Gleiten paralleler  
Schichten aufeinander
- zungenartige Verdrängungsfront
- unterschiedliche Fließgeschwindig-  
keiten im Querschnitt  $V < V_{krit}$
- 60 bis 65% Verdrängung
- keine Waschwirkung, Rückstände an  
Grenzflächen



c) Pfropfenfluß

- gleichmäßiges langsames Ansteigen  
der Flüssigkeit
- gerade Verdrängungsfront (stark ab-  
hängig von Rheologie)
- paralleles Fließen mit geringer Ge-  
schwindigkeit  $V < 0,25 V_{krit}$
- 80 bis 85% Verdrängung
- keine Waschwirkung



Möglichkeit Turbulenz anzustreben, um eine maximale Verdrängung aus Kavernen zu erzielen. Ist dies nicht möglich, dann sind die Parameter der Zementschlämme speziell für optimale Fließbedingungen im Pfropfenfluß auszulegen. Ein Laminarfluß ist wegen des schlechten Verdrängungsgrades weitestgehend zu

vermeiden, jedoch auf Grund der Bohrlochverhältnisse nicht völlig auszuschließen.

Hauptkriterien für eine optimale Verdrängung sind

- konzentrische Lage der Rohre im Bohrloch
- maximale Dichtedifferenz der Zementschlämme zur Spülung
- maximale Differenz der Fließgrenze zwischen Zementschlämme und Spülung

Zur Gewährleistung dieser Voraussetzungen sind zur besseren Verdrängung speziell rheologisch bearbeitete Trennpuffer mit guten Fließeigenschaften einzusetzen.

Durch die Bestückung der Futterrohre mit Zentralisatoren, Turbulenzschellen und Kratzern erfährt der aufsteigende Strömungsfluß eine Richtungsänderung. Beide Suspensionen, Spülung wie Zementschlämme, werden zusätzlich bewegt, gequirt. Wesentlich effektiver kann der Kanalbildung begegnet werden, wenn die Rohrtour außerdem während des Zementationsprozesses gefahren bzw. rotiert wird.

#### Haftfähigkeit des Zementsteines

Der Bindung des Zementsteines zum Gebirge und zur Rohrtour wurde in der letzten Zeit mehr Beachtung geschenkt. Eine hermetische Isolierung der Horizonte ist die vorrangigste Aufgabe einer Zementation speziell für Bohrungen auf Gaslagerstätten. Wenn von Verbesserungen der Haftfestigkeit des Zementgesteines an das Gebirge und an die Rohrtour die Rede ist, dann ist Grundvoraussetzung, daß ein qualitativer Zementstein ohne oder mit geringen Kontraktionseigenschaften im Ringraum ansteht. Auf der Basis dessen sind weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Haftung vorzunehmen (z. B. Salzwasser). Zentralisatoren verleihen der Kolonne einen zentrischen Halt im Bohrloch. Der Zementmantel umschließt die Rohrtour von allen Seiten gleichmäßig. Dieses bewirkt seinerseits eine höhere Dichte der Zementationsintervalle gegenüber einer am Gebirge anliegenden und einseitig zementierten Rohrtour. Um einen besseren Kontakt zwischen dem Zementstein und dem Gebirge zu erzielen, ist es vorteilhaft, den Filterkuchen von der Bohrlochwand zu entfernen bzw. die Spülung so zu be-

arbeiten, daß nur eine geringe Krustenbildung möglich ist. Die Qualität der Bohrspülung beeinflußt die Qualität der Zementationsarbeit wesentlich.

Die Reinigung der Bohrlochwand von Filterkuchen erfolgt auf

- mechanischem bzw. auf
- chemischem Wege

Die mechanische Säuberung der Bohrlochwand vom Filterkuchen beruht im Prinzip darauf, daß durch den Einsatz von Kratzern die Filterkruste abgebürstet wird. Die Rohrtour ist nach Auswertung des anstehenden geologischen Profils in Abständen von 5 bis 10 m mit Kratzern zu bestücken. Beim Einbau der Kolonne wird schon ein großer Teil der Filterkruste im Bohrloch durch die angebrachten Kratzer und Zentralisatoren entfernt. Binnen sehr kurzer Zeit bildet sich erneut eine Filterkruste nach, bedingt durch die im Bohrloch befindliche Tonspülung und unter der Wirkung des hydrostatischen Druckes. Sollen die Kratzer effektiver in ihrer Wirkungsweise eingesetzt werden, dann macht sich ein Fahren der gesamten Rohrtour (mindestens um den Abstand zweier Kratzer voneinander) unmittelbar vor und während des Zementationsprozesses unbedingt erforderlich. Die Filterkruste wird laufend abgebürstet und tritt gemeinsam mit der Spülung übertage aus. Eine erneute Bildung von Filterkuchen kann aus dem Grunde nicht mehr erfolgen, weil die emporsteigende Zementschlämme die Spülung verdrängt und einen direkten Kontakt mit dem anstehenden Gebirge eingeht. Eine andere Methode, die Bohrlochwand von Filterkuchen zu reinigen, ist die Verwendung von sogenannten Waschflüssigkeiten mit besonderen Lösungseigenschaften. Auf die Filterkruste im Bohrloch wirken sie zersetzend, und damit haben sie eine reinigende Wirkung. Die Qualität der Haftung und Bindung des Zementsteines mit der Bohrlochwand hängt in hohem Maße von den Eigenschaften des im Zementationsintervall anstehenden Gebirges ab (Salz, Sandsteine, Tone u. a.). Zur Verbesserung der Haftfähigkeit des Zementes zur Rohrtour wurden verschiedene Methoden und Materialien zur Oberflächenbehandlung der Futterrohre erprobt und eingesetzt. In bezug auf eine verbesserte Haftfähigkeit bietet eine raue

Rohroberfläche eine größere Kontaktzone zum Zementstein. Sie weist aus diesem Grunde eine größere Bindung im Vergleich zu einer glatten Oberfläche auf.

### Mischzonen

Zur Reduzierung der Bildung von Mischzonen zwischen der Zementschlämme und der Bohrspülung werden oftmals Vorpuffer gesetzt. Diese Vorpuffer sollen in ihren Viskositätsparametern theoretisch zwischen den Werten der Spülung und der Zementschlämme liegen. Sie eignen sich sehr gut zur Herstellung turbulenter Strömungen im Ringraum. Sie waschen die Spülung aus den Kavernen aus, vermischen sich mit ihr und werden über Tage ausgetragen. Die Mischzone der Zementschlämme hängt von der Größenordnung des gesetzten Vorpuffers ab. Die Größe der Mischzonen bei der Verdrängung der Spülung durch die Zementschlämme aus dem Ringraum ist abhängig von der Aufstiegs- geschwindigkeit und dem Ringraumquerschnitt, d. h., die Mischzonen sind abhängig vom Verdrängungsregime.

### Zu 3.

Das Fehlen der erforderlichen Festigkeit des Zementsteines ist hauptsächlich auf ein schlechtes Abbindevermögen der Zementschlämme zurückzuführen. Dieses wird bewirkt durch

- ein zu hohes Wasser-Zement-Verhältnis
- chemisch verunreinigtes Anmischwasser
- große Mischzonen zwischen Zement und Spülung

Durch den Zufluß von Schichtwasser, Laugen oder Gasen zur Zementschlämme können die verschiedenartigsten Störungen auf die Festigkeitsentwicklung des Zementsteines auftreten, wie

- Bildung von Wassertaschen im Zementstein
- kein Abbinden des Zementes infolge zu hohen Wassergehaltes
- kein Abbinden des Zementes infolge Laugenzuflusses

Neben einer verminderten Festigkeit ist die Dichtheit des Zementsteines unter diesen Bedingungen sehr in Frage gestellt. In der Regel erreichen aber die meisten Zemente weitaus hö-

here Festigkeitswerte, als in der Tiefbohrtechnik benötigt werden.

## 2.8. Berechnung der Zementation

Als Ausgangsdaten für die Berechnung einer normalen Einstufenzementation sind folgende Angaben erforderlich:

- Einbauteufe der zu zementierenden Rohrtour  $L$  in m
- gebohrter Bohrlochdurchmesser  $D$  in m
- Dimension der eingebauten Rohrtour  $D_R$  in m
- Wanddicke der Rohre  $s$  in m
- Höhe der projektierten Zementsäule  $H$  in m
- Höhe des eingebauten Stopübergangs  $h_0$  in m
- Dichte der Spülung  $\rho_P$  in  $\text{tm}^{-3}$
- Dichte der Zementschlämme  $\rho_Z$  in  $\text{tm}^{-3}$
- Dichte der Nachpumpmenge  $\rho_N$  in  $\text{tm}^{-3}$
- Auskesselungsfaktor  $K_1$

Ausgehend von diesen Angaben wird nacheinanderfolgend berechnet:

### 1. Volumen der Zementschlämme

$$V_Z = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_R^2) K_1 \cdot H + \frac{\pi}{4} d_i^2 \cdot h_0$$

Das theoretische Volumen der Zementschlämme setzt sich zusammen aus dem Volumen des Ringraumes zwischen Gebirge und Rohrtour, dem Volumen der Rohrtour zwischen Stopring, Übergang und Rohrschuh.

- $V_Z$  Volumen der Schlämme in  $\text{m}^3$
- $d_i$  der Innendurchmesser der Rohrtour in m  
 $d_i = D_R - 2s$
- $K_1$  der Auskesselungsfaktor  
für lockere Tertiärschichten  $K_1 = 1,5$   
für alle übrigen Schichten  $K_1 = 1,3$

Das genaue Volumen des Bohrloches erhält man durch die Auswertung der Kaliberkurve. An Hand dieser Kurve läßt sich

ein mittlerer Auskesslungsfaktor (Kalibritätsfaktor) für den gesamten Teufenbereich errechnen. Er ist an Stelle des angenommenen Auskesslungsfaktors  $K_1$  in die Formel einzusetzen.

## 2. Trockenzementmenge je Kubikmeter Schlämme

Da die geforderte Dichte der Zementschlämme vorgegeben und die Dichte des Anmischwassers ebenfalls bekannt ist, kann man den Bedarf an Zement je Kubikmeter Schlämme nach folgender Formel genau errechnen:

$$q = \frac{(\rho_Z - \rho_W)}{\rho - \rho_W} \cdot \rho$$

$\rho$  Dichte des Portlandzementes bzw. des Gemisches in  $\text{tm}^{-3}$

$\rho_Z$  Dichte der Zementschlämme in  $\text{tm}^{-3}$

$\rho_W$  Dichte des Anmischwassers in  $\text{tm}^{-3}$

Süßwasser  $\rho_W = 1,0$

Salzwasser  $\rho_W = (1,15 - 1,25)$

## 3. Gesamte Trockenzementmenge

Die benötigte (gesamte) Trockenzementmenge für die Zementation des gesamten Ringraumes erhält man, indem die Anzahl der Kubikmeter Zementschlämme mit der erforderlichen Zementmenge je Kubikmeter Schlämme multipliziert wird.

$$G = q \cdot V_Z$$

Berechnet man einen möglichen Verlust durch das Bunkern, Anmischen usw. von etwa 10% zur Gesamtmenge, dann ist

$$G_1 = 1,1 \cdot G$$

$G_1$  tatsächlich benötigte Zementmenge in t

## 4. Anmischwasser

Unter der erforderlichen Menge Anmischwasser ist die zum Anmischen der Zementschlämme unbedingt benötigte Portion Süßwasser bzw. Salzwasser zu verstehen. Die Menge des erforderlichen Anmischwassers ergibt sich aus dem Produkt des Wasserfeststoff-Faktors (W:F) und der Trockenzementmenge (G)

$$V_w = (W:F) \cdot G$$

$V_w$  Volumen des Anmischwasser in  $m^3$

Die tatsächlich auf der Anlage zu speichernde Menge Anmischwasser liegt um etwa 20% über der theoretisch benötigten. Diese Sicherheit ist auf Wasserverluste beim Anmischen der Schlämme selbst und beim Säubern des Pumpensystems zurückzuführen. Unter dem Wasser-Feststoff-Faktor versteht man das Mengenverhältnis von benötigtem Anmischwasser zum Zement bzw. Bindefeststoff. Rechnerisch findet dieses seinen Ausdruck in der Formel

$$(W:Z) = \frac{\rho - \rho_z}{(\rho_z - \rho_w) \cdot \rho}$$

In der Regel verwendet man einen (W:F)-Faktor für Schlämmen auf der Basis von

reinem SPZ (W:F) = 0,45 - 0,50

FA-SPZ-Gemisch (W:F) = 0,60 - 0,85

Die (W:F)-Faktoren werden bei der Laboranalyse der einzusetzenden Rezeptur ermittelt.

### 5. Nachpumpmenge

Für das Verpressen der Zementschlämme aus der Rohrtour und für das Pumpen des Stopdruckes ist ein genau berechnetes Volumen der Nachpumpflüssigkeit die wichtigste Voraussetzung.

Die theoretische Nachpumpmenge entspricht dem Volumen der Futterrohre oberhalb des Stopringes.

$$V_D = \frac{\pi d_i^2}{4} (L - h_o)$$

$V_D$  Volumen der Nachpumpflüssigkeit in  $m^3$

Die Rohrintervalle mit unterschiedlicher Wanddicke sind getrennt zu berechnen und anschließend zu addieren. Kompress-



## Kompressibilitätsfaktor der Nachpumpflüssigkeit

- für Wasser  $k_1 = 1,0$
- für andere  $k_2 = 1,03$

$$V_D = 1,03 \cdot \frac{\pi}{4} d_i^2 \cdot (1 - h_0)$$

### 6. Druckverhältnisse

Der beim Verpressen des Zementes auftretende maximale Gesamtdruck setzt sich zusammen aus der Summe zweier Teildrücke

- des statischen Differenzdruckes zwischen Ringraum und Steigraum ( $P_{St}$  in  $\text{kp cm}^{-2}$ )
- der hydraulischen Druckverluste ( $P_h$  in  $\text{kp cm}^{-2}$ )

Demzufolge ist der am Kolonnenkopf zu erwartende Enddruck. Der statische Differenzdruck resultiert aus den unterschiedlich eingepumpten Dichten der Zementschlämme und der Nachpumpmenge. Im Verlauf des Verpressungsvorganges wächst dieser Druck.

$$P_{St} = 0,1 (H - h_0) (\rho_Z - \rho_S)$$

Bei dieser Berechnung werden die Dichten der im Bohrloch, d. h. im Ringraum, befindlichen Spülung und der Nachpumpflüssigkeit als übereinstimmend angenommen.

$$\rho_{sp} = \rho_N$$

Für den Fall, daß sie unterschiedliche Dichten aufweisen und die Zementkopfhöhe außerdem nicht bis übertage projiziert ist, gilt

$$P_{St} = 0,1 (\rho_Z - \rho_N) (H - h_0) + (\rho_{sp} - \rho_N) (L - H)$$

Bei der Berechnung der hydraulischen Druckverluste kann nicht von den normalen Bedingungen der Hydraulik ausgegangen werden, da es sich in diesem Falle nicht um Newtonsche Flüssigkeiten handelt. Für die Bestimmung dieser Größen bezieht man sich auf empirische Formeln.

$$P_h = 0,01 L + 8 \text{ für 1 bis 2 Zementieraggregate}$$

$$P_h = 0,02 L + 16 \text{ für mehr als 2 Aggregate}$$

Diese stark vereinfachte Rechnungsart gibt nur annähernde Werte der tatsächlich auftretenden Drücke. Es existieren noch eine Reihe weitaus genauerer Berechnungsmethoden. Sie sollen wegen ihres Umfangs und ihrer Kompliziertheit nicht behandelt werden.

### 7. Anzahl der Zementieraggregate

Die Anzahl der erforderlichen Zementieraggregate wird bestimmt

- von der zu erreichenden Aufstiegsgeschwindigkeit im Ringraum
- von der maximalen Zementationsdauer, bedingt durch die Abbindezeit der Zementschlämme

Die erforderliche Fördermenge der Anzahl der Aggregate bei einer vorgegebenen Aufstiegsgeschwindigkeit ermittelt sich nach

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_R^2) \cdot v$$

Dann ist die Anzahl der Aggregate

$$n = \frac{Q}{Q_{ZA}} \quad n \geq 1, \text{ immer ganzzahlig}$$

Q erforderliche Gesamtförderrate in  $m^3 s^{-1}$

v Aufstiegsgeschwindigkeit in  $m s^{-1}$

n Anzahl der Aggregate

$Q_{ZA}$  Förderrate eines ZA in  $m^3 s^{-1} ZA^{-1}$

Um ein vorzeitiges Erstarren der Zementschlämme während der Zementationsprozesses, d. h. während des Einpumpens und Verpressens, zu vermeiden, ist dieses entsprechend zu verzögern oder die Zementationsdauer zu verkürzen.

Es gilt die Beziehung:

$$T_Z \leq 0,75 \cdot T_{AB}$$

$T_Z$  Zementationsdauer in min

$T_{AB}$  Abbindebeginn der Zementschlämme in min

Die Anzahl der Mischmaschinen (m) wählt man nach den Gesichtspunkten

- der Förderleistung
- der Nutzlast

$$m = \frac{n \cdot q_{ZA}}{q_{ZM}} = \frac{\text{Förderleistung aller ZA beim Einpumpen}}{\text{Förderleistung einer ZM}}$$

$$m = \frac{G_i}{G_{ZM}} = \frac{\text{Gesamtrockenzementmenge}}{\text{Nutzlast einer ZM}} \quad m \geq 1, \text{ immer ganzzahlig}$$

Die Nutzlast einer Mischmaschine beträgt 9,6 t im öffentlichen Straßenverkehr. Beim stationären Einsatz kann sie bis auf maximal 20 t erhöht werden. In der Praxis werden gewöhnlich zwei Zementieraggregate und eine Mischmaschine zu einer Gruppe zusammengefaßt. Ausgehend von der Nutzlast einer Mischmaschine wird deren Anzahl festgelegt.

### 8. Zementationsdauer

Unter der Zementationsdauer ist die Zeitspanne von Beginn des Einpumpens der Zementschlämme bis zum Schließen des Zementierkopfes nach erfolgtem Nachpumpen und Abspülen zu verstehen. Demzufolge ergibt sich die Zementationsdauer aus der Summe der einzelnen Operationszeiten

- Zeit des Zementeinpumpens  $t_z$
- Zeit zum Stopfen lösen  $t_{St}$
- Zeit des Nachpumpens  $t_N$

Für Liner-, Sektions- oder Mehrstufenzementationen kommen andere notwendige Zeiten hinzu. Die Zeit für das Zementeinpumpen hängt ab von der Menge des benötigten Zementes und von der Förderleistung der Mischmaschine, d. h. von ihrer DüsenEinstellung am hydraulischen Mischer. Erfahrungswerten zufolge werden zum Anmischen einer Tonne Zement etwa 1,5 bis 2 min je Mischmaschine benötigt. Für das Lösen bzw. Einlegen des Nachstopfens wird eine Zeitspanne von 3 bis 10 min veranschlagt.

Die Nachpumpdauer errechnet sich aus dem Verhältnis

$$t_N = \frac{V_D}{n \cdot q_{ZA}} = \frac{\text{Nachpumpmenge}}{\text{Förderleistung der nachpumpenden ZA}}$$

Im Ergebnis dessen ergibt sich die Gesamtdauer der Zementation

$$T = t_E + t_N + t_{St}$$

Die Zementationsdauer ihrerseits darf nicht mehr als 75% des Abbindebeginns der Zementschlämme betragen. Es gilt die Beziehung

$$T_Z \geq T$$