Bohrspülungen in der Flachbohrtechnik

STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH, Hemmersweg 80, 33397 Rietberg, Tel. 05244 – 407 -0, Fax 05244 – 407 – 42, www.stuewa.de

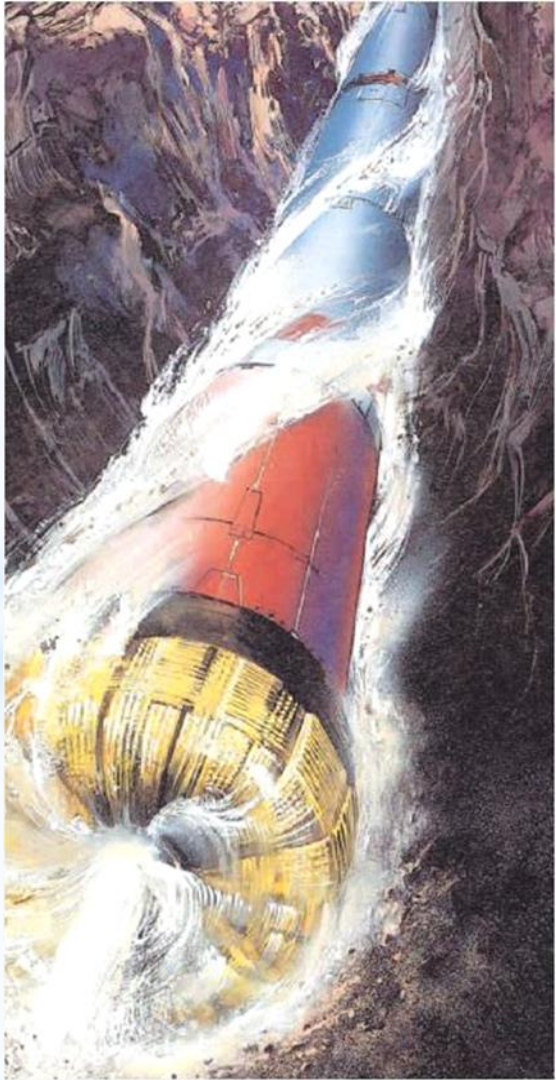
Bohrspülungen in der Flachbohrtechnik

Theoretische Grundlagen der Spülungstechnologie

Der Bergriff der Bohrspülung

Bohrspülungen sind kontrolliert im Bohrloch zirkulierende Fluide, d.h. Flüssigkeiten, Gase oder Mischungen beider, die unter Wahrung der Bohrlochstabilität ein sicheres, störungsfreies, wirtschaftliches und schnelles Erreichen der Endteufe ermöglichen sollen.

→ **Keine Schädigung des Gebirges, so dass das Ziel der Bohrung nicht beeinträchtigt wird**



Funktionen der Bohrspülung

- Vermeidung spülungsbedingter Komplikationen (Spülungsverluste, Kaliberverengungen, Kavernenbildung, Instabilität des Bohrlochs)
- Erhöhung der Lebensdauer der Einzelkomponenten und Geräte durch Erosions- und Korrosionsschäden
- Erfüllung der Forderungen des Arbeits- und Umweltschutzes
- Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit
  - Abdichtung und Stabilisierung der Bohrlochwand
  - möglichst vollständige Reinigung der Bohrlochsohle
  - schneller und vollständiger Austrag des Bohrkleins aus dem Bohrloch
  - Weitgehende Verhinderung der Sedimentation von Bohrklein bzw. Beschwerungsmittel bei Unterbrechung der Zirkulation
  - Ausübung eines regulierbaren Drucks im Bohrloch bei gegebener Notwendigkeit
  - Ggf. Antrieb eines Meißelmotors

Grund- und Zusatzstoffe der Spülung

	Hauptmerkmal
▪ Wasser	Grundstoff/Basis
▪ Anorgansiche Zusätze	Optimierung Anmachwasser
▪ Strukturbildner:	
Feststrukturbildner	Gelstärke und Tixotropie
Flüssigkeiststrukturbilder	Viskositätserhöhung
▪ Filtratsenker	Wasserbindung
▪ Verflüssiger	Visositätsreduzierung
▪ Schmiermittel	Schonung Bohrwerkzeuge
▪ Leichtzusätze	Dichetereduzierung
▪ Beschwerungsmittel	Dichterhöhung
▪ Bakterizide	Abtötung von Bakterien
▪ Stopfungsmaterialien	Verstopfung von Verlustzonen

Grund- und Zusatzstoffe der Spülung

Tiefbohrtechnik

- Tonflocker
- Tonvernetzer
- Rheologische Spezialzusätze
- Korrosionsinhibitoren

Wasser

Vorteile:

- **Durch die niedrige Dichte von ca. 1,0 g/cm^3 ermöglicht es die höchste Bohrgeschwindigkeit**
- **Führt zum Erweichen des Gesteins und zur Erweiterung von Mikrorissen**
- **Im klüftigen und poröses Gestein wird der Energieaufwand der Gesteinszerstörung herabgesetzt**
- **Gute Kühlwirkung durch hohe Wärmekapazität**
- **Günstig und fast immer verfügbar**

Wasser

Nachteile:

- **Niedrige Viskosität**
- **Keine Ausbildung einer Fest- bzw. Gelstruktur**
- **Infiltration in permeables Gebirge**
- **Herabsetzen der Bohrbarkeit von Tongesteinen durch Erweichen, Herausbrechen und Nachfall**
- **Begünstigt eine Dispersion (feine Verteilung) des Bohrkleins, und kann somit bei Tongesteinen zu *selbstgängigen* Tonspülungen übergehen**
- **Schlechte Schmierwirkung**

Wasser

Beachtung beim Einsatz:

- **Ausschließlich saubere salz- und bakterienfreie Wässer (z.B. Brunnenwässer) verwenden**
- **Ggf. Wasser enthärten d.h.: Härtebildner, wie $Ca(HCO_3)_2$ durch Zusatz von Soda ausfällen (3 – 5 g/l Soda bei mittlerer Wasserhärte)**
- **pH-Wert optimieren (8,5 – 9,5)**
- **Fluss- und Teichwässer möglichst nicht verwenden, da evtl. enthaltene Bakterien die teuren organischen Polymere zerstören können**

Anorganische Zusätze

- **Optimierung des pH-Wertes von Bentonitspülungen:**
  Bei Bentoniten:pH8 –pH10
  Bei Subbentoniten:pH7 –pH9

- **Optimierung des pH-Wertes von Polymerspülungen:**
  Stärke, Na+-CMC, PAC:pH8 –pH10

- **Enthärtung, d.h.: Regulierung der Ca++-Konzentration in Kalkspülungen**

<u>Weitere positive Nebeneffekte:</u>

- **Anhebung der Gelstärke von Tonspülung**

- **Minimierung der Korrosion von Stahl**

Anorganische Zusätze

- **Alkalien**

Soda (Na_2CO_3):	Wasserenthärtung / Optimierung pH-Wert
Ätznatron (NaOH):	Optimierung pH-Wert
Ätzkali (KOH):	Optimierung pH-Wert
Pottasche (K_2CO_3):	Wasserenthärtung / Optimierung pH-Wert
Löschkalk ($Ca(OH)_2$):	starkes Alkali / Tonquellungsinhibierung

- **Salze**

Kochsalz bzw. Steinsalz (NaCl):	Erhöhung der Gelstärke
Sylvenit(KCl):	osmotische Stabilisierung von Tonen
Magnesiumchlorid ($MgCl_2$):	Bohrungen in $MgCl_2$-Gesteinen
Calciumchlorid ($CaCl_2 \cdot 6 H_2O$):	osmotischeStabilisierung in wasserempf. Tonen

Strukturbildner

Feststrukturbildner (Bentonite)

- Bentonite
- Subbentonite
- Grubenfeuchte Rohtone

Tiefbohrtechnik:

- Salzfeste Tone (Salztone)
- Magnesiumsilikate (Palygorskit, Attapulgit)
- Sepiotith(Meerschaum)
- Asbest
- Mineralwolle

Feststrukturbildner beeinflussen ebenfalls die Flüssigkeitsstruktur und haben filtratsenkende Eigenschaften

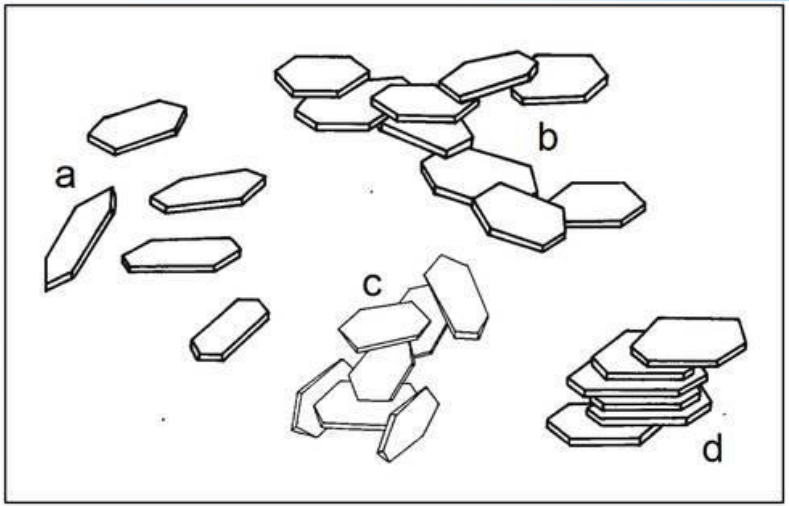
Flüssigkeitsstrukturbildner (Polymere)

- Stärke
- Pflanzengumme(Polysaccharide natürlicher Herkunft)
- Na+-CMC
- PAC
- PA (Polyacrylat)
- PAA (Polyacrylamide)

Flüssigkeitsstrukturbildner haben durch hohes Wasserbindevermögen filtratsenkende Eigenschaften, bilden jedoch keine Feststruktur

Feststrukturbildner (Bentonite)

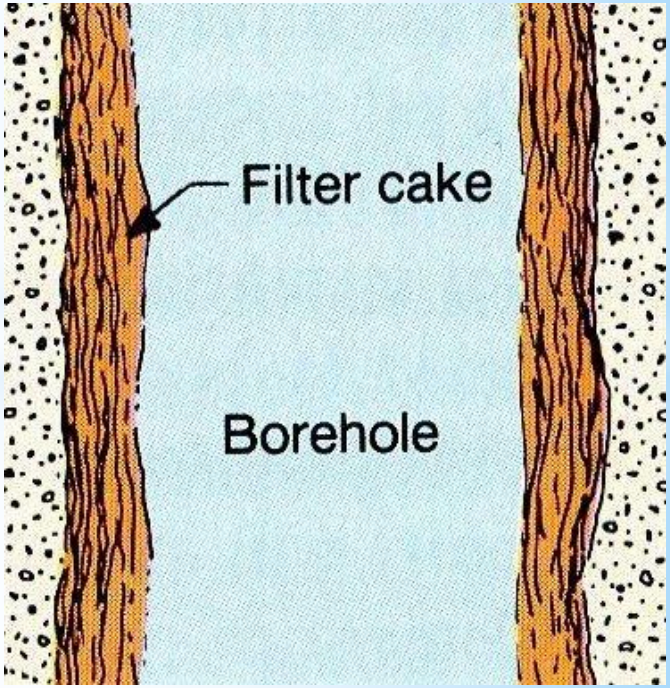
- **FeinplättrigeTonminerale der Smektit-Gruppe**
- **Zunehmende Adsorption von Wasser führt zur Quellung**
- **Vollständige Dispersion (feine Verteilung) der Teilchen unter mechanischer Belastung führt zu einer kolloidalen Lösung (Sol)**
- **Nach Beendigung mechanischer Belastung Übergang in Feststruktur (Gel)**
- **Messbare Gelstärke**
- **Sol-Gel-Übergang = Thixotropie**



Modellvorstellungen:
a: Sol: vollständig delaminierte Partikel
b: 3-dimensionale Bänder-Struktur
c: Gel: 3-dimensionale Kartenhaus-Struktur
d: Aggregate (Flocken)

Feststrukturbildner (Spülungstone)

- Ausbildung einer Gerüststruktur im Wasser durch aneinander haftende Plättchen, Fasern, Fäden
- Erreichen einer messbaren Festigkeit (Gelstärke)
- Thixotropes Verhalten
- Erhöhung des Austragsvermögens für Bohrklein
- Verringerung des Absinkens von Cuttings
- Deutliche Erhöhung der Viskosität
- Senkung des Filtratwasserverlustes durch Bildung eines Filterkuchens aus dicht gepackten Tonteilchen
- Reduzierung der Reibung zwischen Bohrstrang und Gebirge
- Erhöhung der Spülungsdichte und dadurch Erhöhung des Druckes im Bohrloch

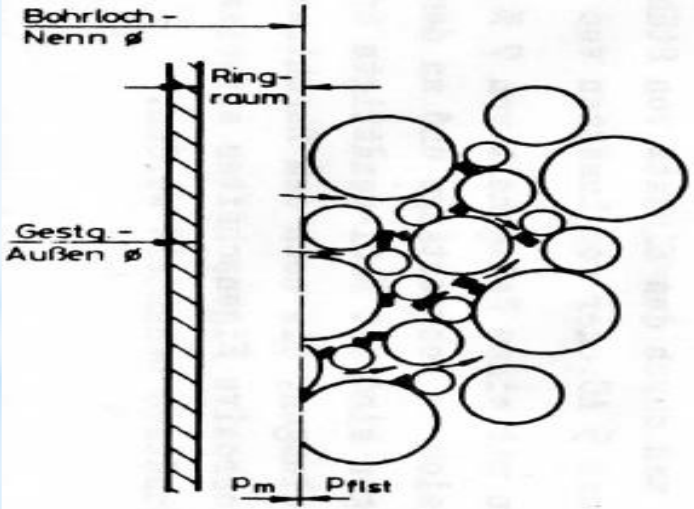


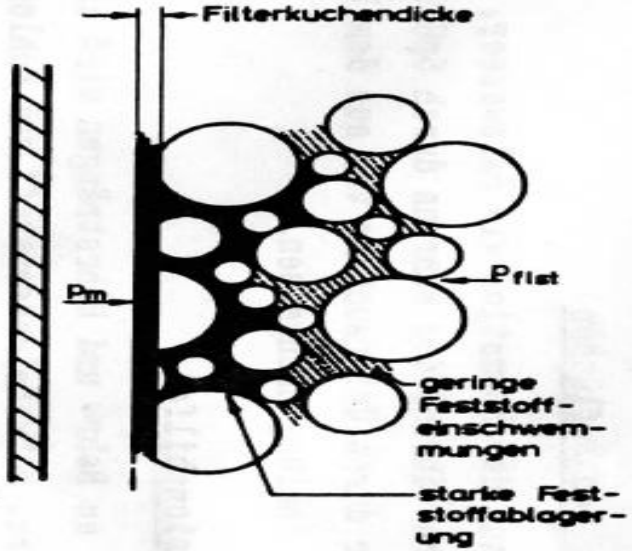
Quelle: Groundwater and Wells

STÜWA
BRUNNENFILTER
BOHRBEDARF

Voraussetzungen:

1. Porosität des Gebirges
2. Permeabilität des Gebirges
3. Druckgefälle zwischen p_{mst} und p_{fist}





1. Phase:
Infiltration von Flüssigkeit mit Feststoffteilchen und Teilblockierung der Durchlässe

2. Phase:
Aufbau des Filterkuchens bis zur geringsten Durchlässigkeit unter Beibehaltung von $p_{mst} > p_{fist}$

Feststrukturbildner (Polymere)

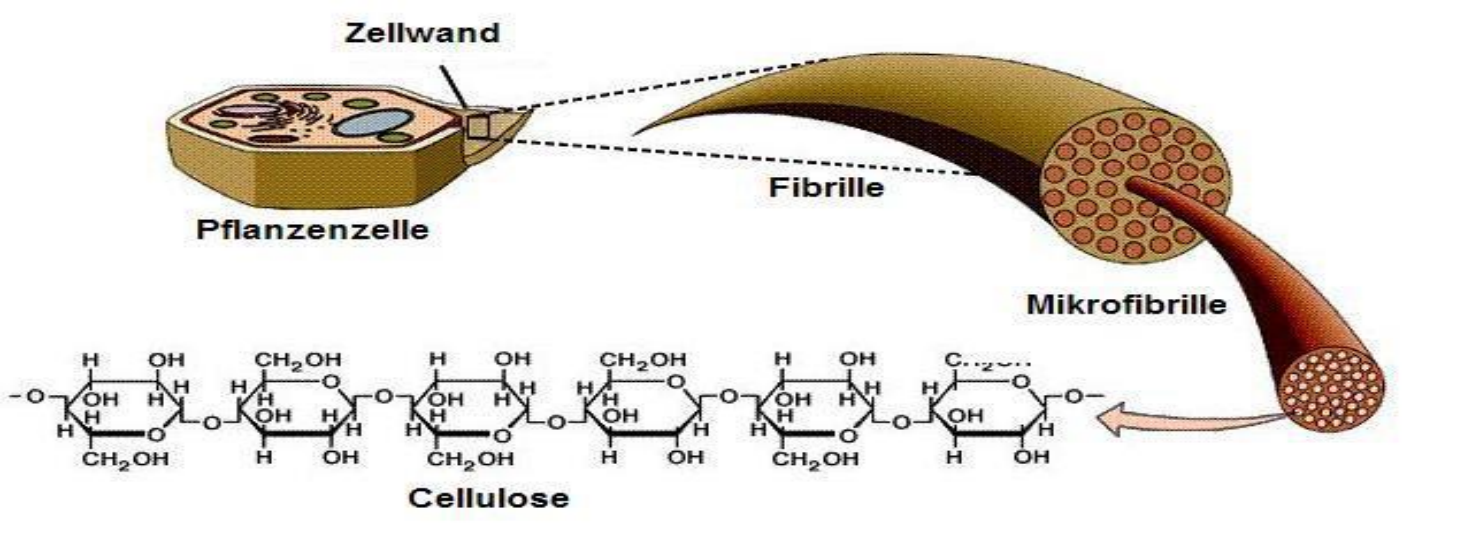
Eigenschaften:

- **Sehr hohes Wasserbindevermögen**
- **Deutliche Erhöhung der Viskosität**
- **Intensiver Austrag von Bohrgut bei geringen Aufstiegsgeschwindigkeiten möglich**
- **Reduzierung der Filtratwasserabgabe**
- **<u>Jedoch kein thixotropes Verhalten, somit keine Gelstärke</u>**
- **Dadurch besseres Absetzverhalten im Spülteich**
- **Funktion als Schutzkolloid**

Carboxmethylcellulose (CMC)

Grund-bzw. Struktursubstanz ist pflanzliche Cellulose (Zellstoff):

- **Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände**
- **Häufigste organische Verbindung auf der Erde**
- **Unverzeigtes Polysaccharid (Kohlenhydrat) aus Glukosemolekülen**

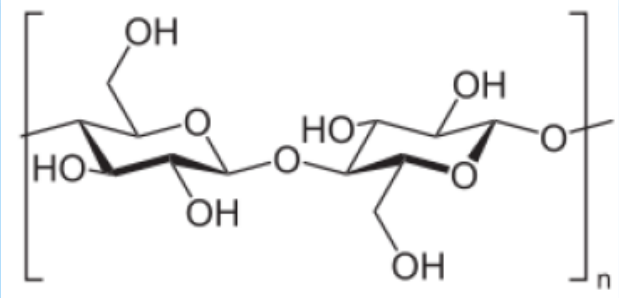


CMC - Herstellung

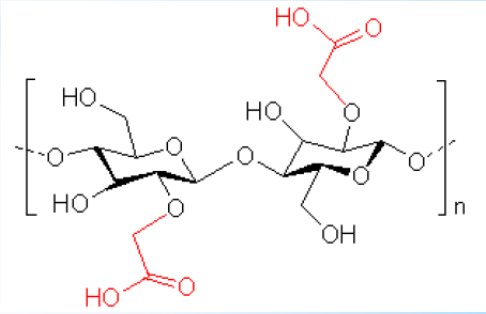
NaOH(aq)
Natronlauge

Chloressigsäure

Zellstoff → Mahlung → Alkalicellulose → Verehterung → Roh-(Na+-) CMC



wasserunlöslich



wasserlöslich

CMC - Herstellung

Methanol-Wasser-Wäsche

„Technische“ Na-CMC
(enthält NaCl-Verunreinigungen)

Roh-(Na+-) CMC

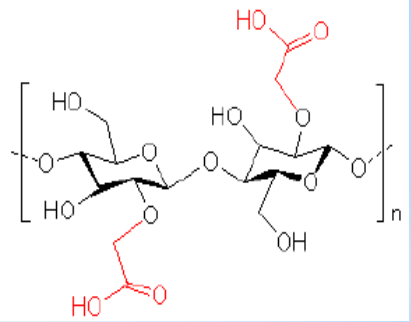
Trocknung + Mahlung

Intensive Methanol-Wasser-Wäsche

Polyanionische Cellulose
PAC
(Reinheitsgrad von bis zu 98%)

CMC - Polymerqualität

Entscheidende Kriterien für die Polymerqualität:



- **Durchschnitts-Polymerisationsgrad (DP)**

  Durchschnittliche Anzahl der Anhydroglukose-Einheiten pro Cellulose-Molekül

  Bei CMC oder CMHEC zwischen 200 und 2.000 Einheiten/Molekül

- **Substitutionsgrad oder Veretherungsgrad (DSoder SG)**

  Durchschnittliche Anzahl der an ein Glukoseeinheit gebundenenCarboxy-Methyl-Gruppen

  Bei CMC oder CMHEC zwischen 0,5 und max. 1,5 (üblich ca.0,9 / z.B. Antisol)

  Wasserlöslichkeit steigt mit steigendem DS bzw. SG und beginnt bei ca. 0,4

Die Beschaffenheit der Ausgangs-Cellulosefasern ist hierfür von entscheidender Bedeutung.
Der Zellstoff der Baumwollfaser wird i.d.R. für hochviskose CMC, der Holzzellstoff eher für niedrigviskose CMC verwendet.

Polymere als Filtratsenker

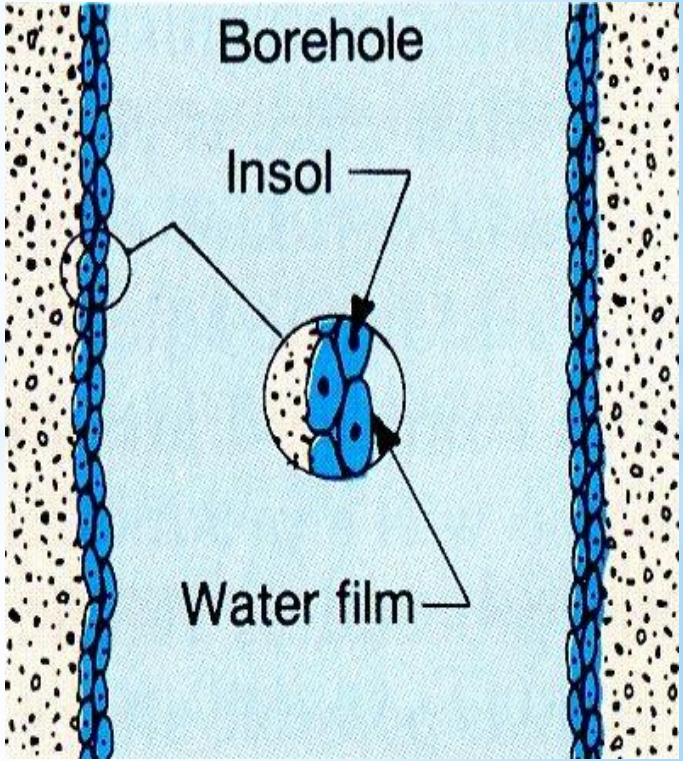
Hoher Gehalt an negativen elektrischen Ladungen (OH--, COO--Gruppen)

- **Durch große Affinität zu Wasser umgeben sich diese Moleküle mit einer fest haftenden dicken schleimartigen Hydrathülle**

Deutliche Erhöhung der Viskosität

- **Intensive Adsorption (Anreicherung) an Tonpartikeln mit Ausbildung einer festen, stark wasserhaltigen Schutzhülle, die die Zwischenräume zwischen den Tonpartikeln verkleinert**

Abnahme der Durchlässigkeit des Filterkuchens durch mechanisch-physikalisches Verstopfen der Poren der Ton-Filterkruste führt zur Reduzierung der Filtratmenge

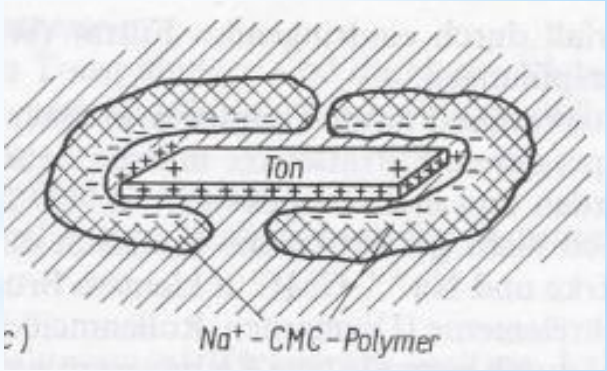


Quelle: Groundwater and Wells

Merke: Polymere alleine bilden keinen Filterkuchen aus

Polymere als Schutzkolloid

- Funktion als „Schutzkolloide“ gegen den koagulierenden (verklumpenden), ausfällenden Einfluss von Salzionen
- Verhinderung von Quellung von durchteuften Tonhorizonten
- Schutz vor weiterem Zerfall des Tonbohrkleins
- Verbesserung des Austrages
- In geringen Konzentrationen können Filtratsenker dispergierte Tone ausfällen
- Guter Schmiereffekt und Senkung des Strömungswiderstandes
- Erhöhung der Thixotropie bestehender Tonspülungen
- u.U. Höhere Bohrgeschwindigkeiten im Vergleich zu Tonspülungen
- Als Zusatz zu Tonspülungen erhöhter Kerngewinn im nichtbindigen Lockergestein
- Bessere Sedimentation, da keine Gelstärke (vgl. Bentonit)



Quelle: W. Arnold, Flachbohrtechnik

Polymere - Übersicht

- Native Polymere
  - Stärke / veredelte Stärke
  - Guar Gum

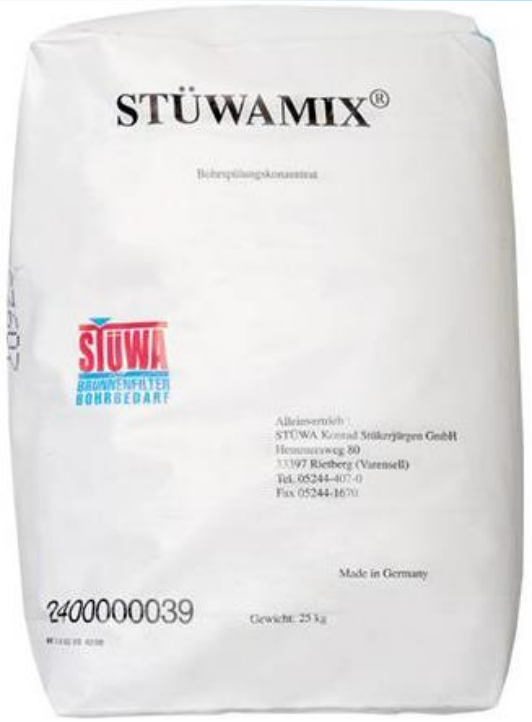
- Halbsynthetische (chem. Modifizierte) Polymere
  - Rein-CMC (salzfrei) / Polyanionische Carboxy-Methyl-Cellulose (PAC)
    - STÜWA-FLOW PAC
    - Viscopol
    - Antisol FL 30000

  - Technisches CMC / Carboxy-Methyl-Cellulose / (Na-CMC)
    - LV-CMC (niedrigviskos), z.B. STÜWA-Hipercel LV, Tylose BT
    - HV-CMC (hochviskos), z.B. STÜWA-Hipercel HV, Tylose VHR
    - CMHEC (Na-CMC + Hydroxyethylcellulose), z.B. SBF-Visopol HEC, Phrikolat HEC 100

- Vollsynthetische Polymere (PAA / PA)
  - Polyacrylamide / Polyacrylate
    - Stokopol D2624/3812
    - GS 550 / 550L

Kombiprodukte (One-Bag-Additive)

- Kombination aus Na-Bentonit und PAC (Rein-CMC)
- Kein zeitaufwendiges Zumischen und Kontrollieren notwendig
- Geringere Einsatzmengen im Vergleich zu reinem Bentonit
- Innerhalb sehr kurzer Zeit einsetzbar
- Erhöhung der Viskosität bereits beim Anmischen
- Bei einem Großteil der auftretenden Bohrsituationen einsetzbar



Verflüssiger

- Senkung der Gelstärke durch Abbau des Gelgerüstes, ohne Verdünnungseffekt
- Einfluss auf Fließgrenze, Bingham-Werte und Trichterauslaufzeit (TAZ)
- Keine Reduzierung der Plastischen Viskosität (u.U. sogar Erhöhung)
- Führt zur Dispersion und somit zum Eindicken der Spülung
- Wirken schwach filtratsenkend
- Einsatz vor allem als tonsteinstabilisierende (dispergierten Spülungen) wie Kalk-oder Gipsspülungen
- Wie bei filtratsenkenden Zusatzstoffen gilt es unbedingt die Reihenfolge zu beachten:
  Verflüssiger vor Zugabe von z.B. Löschkalk oder Steinsalz zur Regulierung von pH-Wert und /oder Härtegrad

Verflüssiger

- Kondensierte Phosphate
  Tetranatriumdiphosphate(TSPP) = Backtriebmittel

Tiefbohrtechnik:

- Gerbstoffe (Tannine)
- Lignosulfonatderivate(LS)
  Q-Broxin(FCLS), USA
  Spersene(CLS), USA
  Gröligan(CrLS/ FeCrLS), ehem. DDR
  LS 22 (CrLS), Deutschland

- Huminate/ Lignite (L)
  Duratherm(XP-20), USA
  Nitroligin, Rußland
  Chlorlignin, Rußland
  Sunil, Rußland

© F. Aigner / TU Wien

Schmiermittel

- Bentonite und Filtratsenker wie Na+-CMC, Polyacrylate und Polyacrylamide haben als Nebeneffekt infolge ihrer dicken Hydrathüllen eine Schmierwirkung, welche i.d.R. für die Anwendungsfälle im Brunnenbau und der oberflächennahen Geothermie ausreichend ist

- Für kleinkalibrige Bohrungen mit hohen Drehzahlen sind spezielle HD (Hochdruck)-Schmiermittel (engl.: EP-lubs = extreme pressure lubricants) notwendig (z.B. Bit-lube, USA)

- Normale Schmiermittel wie Öle und Graphite werden an der Metalloberfläche lediglich lose physikalisch absorbiert und finden in diesen Fällen seltener Anwendung

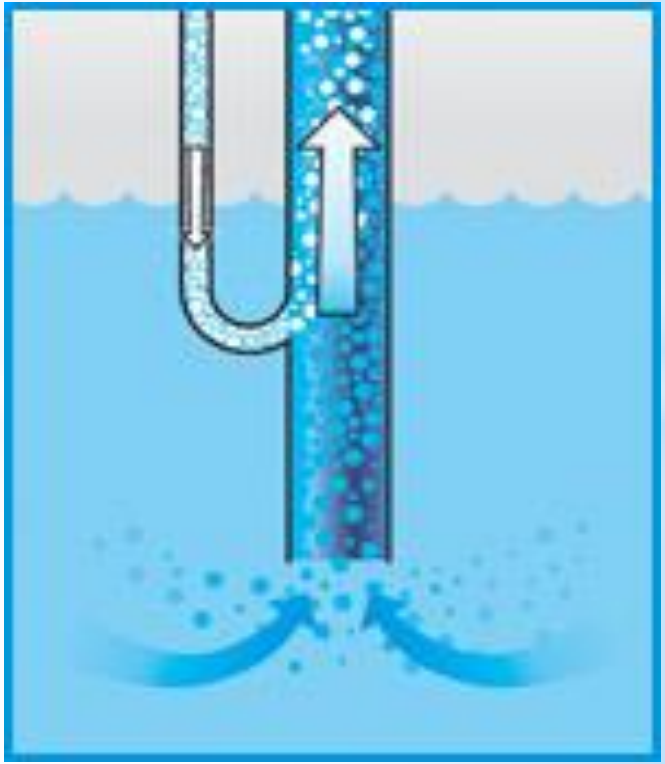
- Generell ist ein Nachweis für deren wasserwirtschaftliche Unbedenklichkeit notwendig

Leichtzusätze

- Verwendet wird fast ausschließlich Luft, die über Kompressoren eingepresst oder durch Schnüffelventil eingesogen wird

- Dienen zum Herabsetzen der Spülungsdichte als Präventions- bzw. Gegenmaßnahme bei Spülungsverlusten

- Beim Lufthebebohren bedient man sich ebenfalls dieser Maßnahme (Prinzip der Mammutpumpe)



Beschwerungsmittel

- Durch Aufnahme von Bohrklein kann sich eine Tonspülung selbst bis auf ρ = 1250 bis 1300 kg/m^3 erhöhen
- Besteht die Notwendigkeit, die Dichte der Spülung und somit den statischen Druck auf die Bohrlochsohle weiter zu erhöhen (Arteserbohrungen), kommen inerte (chemisch „untätige“) Materialeien zum Einsatz:
  - Kreide ρ = 2600 kg/m^3 ρ_{max} (Spülung) = 1500 kg/m^3
  - (Baryt) Schwerspat ρ = 4300 kg/m^3 ρ_{max} (Spülung) = 2400 kg/m^3
  - Eisenoxid (Hämatit) ρ = 4900 kg/m^3 ρ_{max} (Spülung) = 2400 kg/m^3
  - Eisenpulver ρ = 7900 kg/m^3 ρ_{max} (Spülung) = 2500 kg/m^3
  - Pb_3O_4 (Bleimennige) ρ = 9100 kg/m^3 ρ_{max} (Spülung) = 2500 kg/m^3

STÜWA
BRUNNENFILTER
BOHRBEDARF

Erhöhung des spezifischen Gewichtes durch Schwerspat (φ = 4,2) 6.7.2.4

Gewünschtes spezifisches Gewicht der Dickspülung

Zusätzliche Menge Schwerspat in kg je 1000 Liter der vorhandenen Dickspülung

Vorhandenes spezifisches Gewicht der Dickspülung	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0	2,05	2,1	2,15	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,45	2,5	2,55	2,6	Vorhandenes spezifisches Gewicht der Dickspülung
1	O	67	136	207	280	356	435	515	600	687	778	872	960	1071	1176	1287	1401	1510	1642	1772	1908	2051	2200	2357	2521	2694	2876	3068	3263	3477	3704	3944	4199	1
1,05		O	68	138	210	285	362	442	525	611	700	792	889	988	1092	1201	1313	1429	1551	1679	1813	1953	2100	2254	2416	2586	2765	2955	3147	3357	3580	3817	4068	1,05
1,1		1000	O	69	140	214	290	368	450	534	622	713	808	906	1008	1115	1226	1339	1460	1586	1718	1855	2000	2152	2311	2478	2655	2841	3030	3237	3457	3690	3937	1,1
1,15		2000	500	O	70	142	217	295	375	458	544	634	727	824	924	1029	1138	1250	1389	1493	1622	1758	1900	2049	2206	2371	2544	2727	2914	3118	3333	3562	3806	1,15
1,2		3000	1000	334	O	71	145	221	300	382	467	555	646	741	840	943	1051	1161	1277	1399	1527	1660	1800	1947	2101	2263	2434	2614	2797	2998	3210	3435	3675	1,2
1,25		4000	1500	668	250	O	72	147	225	305	389	475	565	659	756	858	963	1071	1186	1305	1431	1563	1700	1844	1996	2155	2323	2500	2681	2878	3086	3308	3543	1,25
1,3		5000	2000	1000	500	200	O	74	150	229	311	396	485	577	672	772	876	982	1095	1213	1336	1465	1600	1742	1891	2047	2212	2386	2564	2758	2963	3181	3412	1,3
1,35		6000	2500	1333	750	400	167	O	75	153	233	317	404	494	588	686	788	893	1004	1119	1240	1367	1500	1639	1786	1940	2102	2273	2448	2638	2840	3053	3281	1,35
1,4		7000	3000	1668	1000	600	333	143	O	76	156	238	323	412	504	600	701	804	912	1026	1145	1270	1400	1537	1681	1832	1991	2159	2331	2518	2716	2926	3150	1,4
1,45		8000	3500	2000	1250	800	500	286	125	O	78	158	242	329	420	515	613	714	821	933	1050	1172	1300	1434	1576	1724	1881	2045	2214	2398	2593	2799	3018	1,45
1,5		9000	4000	2334	1500	1000	667	428	250	111	O	79	162	247	336	429	525	625	730	840	954	1074	1200	1332	1471	1616	1770	1932	2098	2278	2469	2672	2887	1,5
1,55		10000	4500	2667	1750	1200	832	570	375	222	100	O	81	165	252	343	438	536	639	746	850	977	1100	1230	1366	1509	1659	1818	1981	2158	2346	2545	2756	1,55
1,6		11000	5000	3000	2000	1400	1000	714	500	333	200	91	O	82	168	257	350	446	547	653	763	879	1000	1127	1261	1401	1549	1705	1865	2038	2222	2417	2625	1,6
1,65		12000	5500	3334	2250	1600	1167	855	625	444	300	182	83	O	84	172	263	357	456	560	668	781	900	1025	1155	1293	1438	1591	1740	1918	2099	2290	2493	1,65
1,7		13000	6000	3667	2500	1800	1333	993	750	555	400	272	166	77	O	86	175	269	335	466	573	684	800	922	1050	1185	1327	1477	1632	1799	1975	2163	2362	1,7
1,75		14000	6500	4000	2750	2000	1500	1141	875	666	500	363	250	144	71	O	88	170	274	373	477	586	700	820	945	1078	1217	1364	1515	1679	1852	2036	2231	1,75
1,8	∞	15000	7000	4334	3000	2200	1667	1285	1000	777	600	454	333	231	143	67	O	89	182	280	382	489	600	717	840	970	1106	1250	1399	1559	1728	1908	2100	1,8
1,85		16000	7500	4668	3250	2400	1833	1428	1125	888	700	545	416	318	214	133	63	O	91	187	286	391	500	615	735	862	996	1136	1282	1439	1605	1781	1969	1,85
1,9		17000	8000	5000	3500	2600	2000	1570	1250	999	800	636	500	384	286	200	125	59	O	93	191	293	400	512	630	754	885	1023	1166	1319	1481	1654	1837	1,9
1,95		18000	8500	5334	3750	2800	2167	1713	1375	1110	900	727	583	461	357	266	187	118	55	O	95	195	300	410	525	647	774	909	1049	1199	1358	1527	1706	1,95
2,0		19000	9000	5668	4000	3000	2330	1856	1500	1221	1000	817	666	538	428	333	250	176	111	53	O	98	200	307	420	539	664	795	932	1079	1235	1399	1575	2,0
2,05		20000	9500	6000	4250	3200	2500	2000	1625	1332	1100	908	750	615	500	400	312	235	166	105	50	O	100	205	315	431	553	682	816	959	1111	1272	1444	2,05
2,1		21000	10000	6334	4500	3400	2667	2143	1750	1444	1200	1000	833	692	571	467	375	294	222	158	100	48	O	102	210	323	442	569	699	839	988	1145	1312	2,1
2,15		22000	10500	6667	4750	3500	2833	2286	1375	1556	1300	1091	917	769	643	533	438	353	278	211	150	95	45	O	105	216	332	455	583	719	865	1018	1181	2,15
2,2		23000	11000	7000	5000	3800	3000	2429	2000	1667	1400	1182	1000	846	714	600	500	412	333	263	200	143	91	43	O	108	221	341	466	600	741	891	1050	2,2
2,25		24000	11500	7333	5250	4000	3167	2571	2125	1778	1500	1273	1083	923	786	667	563	471	389	315	250	190	136	87	42	O	111	227	350	480	617	763	919	2,25
2,3		25000	12000	7667	5500	4200	3333	2714	2250	1889	1600	1364	1167	1000	857	733	625	520	444	368	300	239	182	130	83	40	O	114	233	360	494	636	787	2,3
2,35		26000	12500	8000	5750	4400	3500	2857	2375	2000	1700	1455	1250	1077	928	800	688	580	500	421	350	286	227	174	125	80	38	O	117	240	370	508	655	2,35
2,4		27000	13000	8333	6000	4600	3667	3000	2500	2111	1800	1546	1333	1154	1000	867	750	647	555	474	400	333	273	217	167	120	77	37	O	120	247	382	525	2,4
2,45		28000	13500	8667	6250	4800	3833	3143	2625	2222	1900	1636	1417	1231	1071	933	813	705	611	526	450	381	318	261	208	160	115	74	36	O	123	254	394	2,45
2,5		29000	14000	9000	6500	5000	4000	3286	2750	2333	2000	1727	1500	1308	1143	1000	875	765	667	579	500	429	334	304	250	200	154	111	71	34	O	127	262	2,5
2,55		30000	14500	9333	6750	5200	4167	3429	2875	2444	2100	1818	1583	1385	1214	1067	938	824	722	632	550	476	409	348	292	240	192	148	107	69	33	O	131	2,55
2,6		31000	15000	9887	7000	5400	4333	3571	3000	2554	2200	1800	1697	1462	1286	1133	1080	832	774	684	600	524	455	391	333	280	231	185	143	103	67	32	O	2,6

Zusätzliche Menge Wasser in Liter je 1000 Liter der vorhandenen Dickspülung

1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0	2,05	2,1	2,15	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,45	2,5	2,55	2,6

Gewünschtes spezifisches Gewicht der Dickspülung

Tonflocker

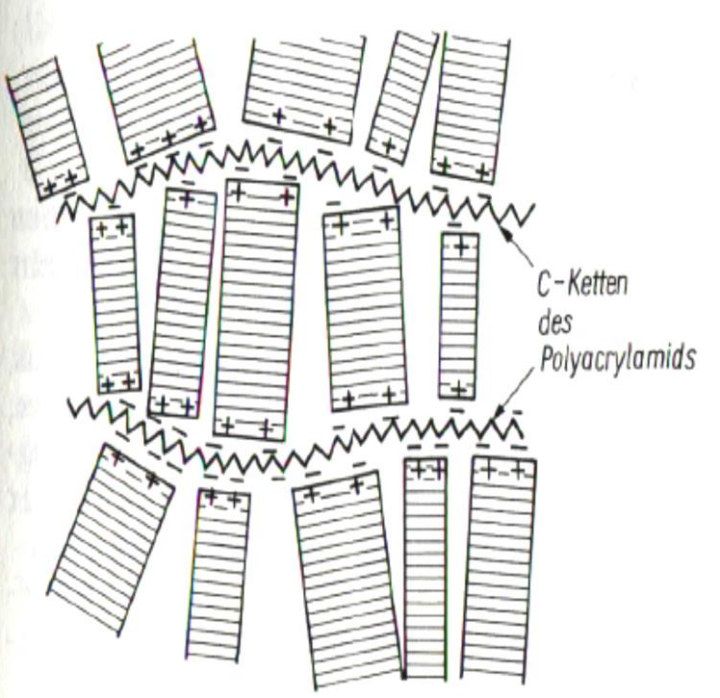
- Organische Polymere großer Molmassen und geringer elektrischer Ladung
- in Kombination mit Ca^{++}-Salzen lagern diese viele Tonpartikel an ihr Reisenmolkül an
- Ca^{++}-Salze stets vor Tonflockern
- Totale Tonflocker:

  Rapidrill (USA)

  Drill aid (USA)
- Selektive Tonflocker

  Marwit (Polen)

  Low Flow (USA)



Tonflocker werden in sehr geringen Konzentrationen (0,01 bis 0,1 g/l) eingesetzt. Mittlerweile hat sich die mechanische Abtrennung (Desilter) gegenüber dieser Methode durchgesetzt

Rheologische Spezialzusätze (Scherverflüssiger)

- Dienen zur Reduzierung des Strömungswiderstandes in engen Querschnitten bzw. hohen Schergefällen
- Fadenförmige, stark wasserbindende Polymere (Filtratsenker, Biopolymere)
- Trotz geringer Einsatzkonzentrationen (ab etwa 0,03 g/l) kann der aufzuwendende Pumpendruck bis zu 30 % gesenkt werden

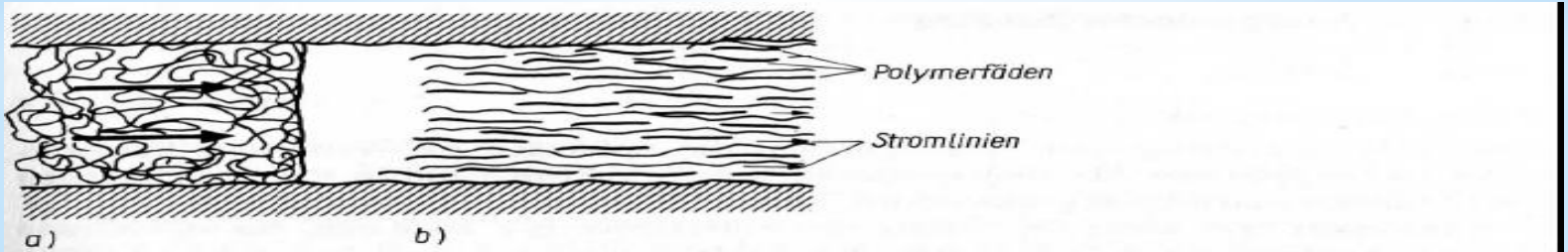


Bild 8.17. Vereinfachte Darstellung einer Rohrströmung
a) ohne Zusatz glättender Polymere: Turbulenz, b) stark reduzierte Turbulenz nach Zusatz glättender Polymere: TOMS-Effekt

Quelle: W. Arnold, Flachbohrtechink

Korrosionsinhibitoren

- Einsatz überwiegend in der Tiefbohrtechnik
- Ab einem pH-Wert unter 10 müssen Inhibitoren eingesetzt werden, die an der Metalloberfläche der Werkzeuge einen wasserabstoßenden Film bilden
- Zum Einsatz kommen hier z.B. Natriumnitrit, Hydrazin, Natriumsulfat, Phosphate, Borate, Chromate oder Tendside

Bakterizide

- Dienen zum Abtöten von Bakterien, deren Enzyme vor allem hochpolymere Filtratsenker aber auch CMC-Produkte zersetzen können

- Sonst Gefahr des Funktionsverlustes der Spülung sowie Förderung der Vermehrung von Mikroorganismen

- Zum Einsatz kommen überwiegend:
  - Formalin
  - Natriumhypochlorit / Chlorbleichlauge (NaOCl)
  - Glutaraldehyd (BASF)

Stopfungsmaterial

- Grobes Material
  - Heu-, Säge- und Hobelspäne
  - Baum- und Schafswolle
  - Papierschnitzel
  - Nuss- und Muschelschalen
  - Rückstände der Zuckerfabriken
  - Grobes Tonpulver (Subbentonit)

- Feines Material
  - Glimmerschuppen
  - Celluloseschnitzel
  - Kleine Holzfasern
  - Sägemehl

- Tiefbohrtechnik
  - Asphalt
  - Trass

Tonvernetzer (Bentonitextender)

- Vernetzung der Tonplättchen der vorhandenen Spülung zu einem lockeren Raumnetz
- Steigerung von Viskosität, Gelstärke und Fließgrenze bei gleichzeitiger Filtratsenkung
- Erforderliche Einsatzmengen an Bentoniten können durch sehr geringe Mengen (0,01-0,1 g/l) dieser Polymere (Viscosifier) unter Verbesserung der Spülungsqualität deutlich (10 % -20 %) herabgesetzt werden
- Verwendung finden:
  Spezielle Polyacrylamide (PAA) mit begrenztem Gehalt an Polyacrylat (Na+-PA)

Spülungsuntersuchung

- Grundlage ist DIN EN ISO 10414-1 bzw. API RP 13B

- Grundsätzlich gilt: jede Untersuchung ist nur so gut wie ihre Probe

- Probenahme und Vorbereitung:

  Probenahme an (bezogen auf die Aufgabenstellung) richtiger Stelle

  Homogenisieren durch intensives Rühren vor der jeweiligen Untersuchung

  Vor den rheologischen Untersuchungen sind die Gelstärken durch langes Rühren (z.B. mittels Ultraturrax) und durch mehrfache Kontrollen maximal abzubauen

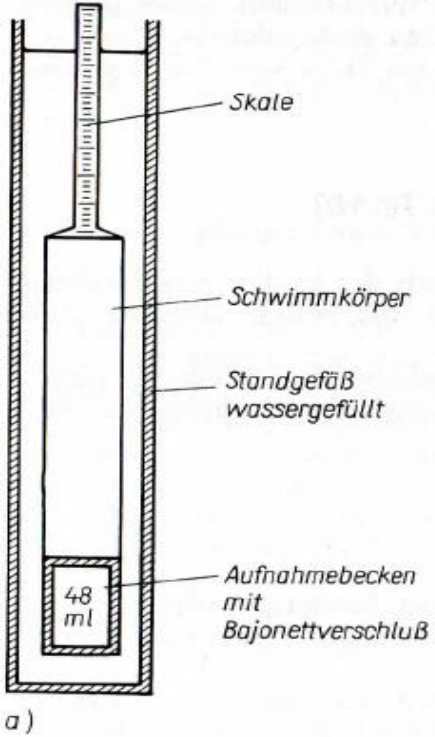
STÜWA
BRUNNENFILTER
BOHRBEDARF

	Spülungsdaten	Kurzzeichen	Einheit	Messgerät / Messmethode
1.	Dichte	**ρ**	kg/l	Hydrometer oder Spülungswaage
2.	Trichter-Auslaufzeit	**taz**	s	Marsh-Trichter
3.	Restauslaufzeit	**raz**	s	Marsh-Trichter
4.	Austrittstemperatur	**θ**	°C	Thermometer
5.	Wasserabgabezeit /Ringwert	**waz / Ri**	s	Ringapparat bzw. Ringgerät
6.	Wasserverlust	**wv**	ml	Filterpresse nach API
7.	Filterkuchendicke	**fk**	mm	Dickenmessgerät
8.	pH-Wert (Filtrat)	**pH**		Indikatorstäbchen / pH-Meter
9.	pH-Wert (Spülung)	**pH**		Indikatorstäbchen / pH-Meter
10.	Sandgehalt	**sd**	Vol-%	Sand-Content-Set / Sandmessglas
11.	Salzgehalt (NaCl)	**sz**	g/l	Titration
12.	Sulfatgehalt	**sulf**	qualitativ	Titration
13.	Alkalität (Filtrat)	**pf**	ml	Titration
14.	Alkalität (Spülung)	**pm**	ml	Titration
15.	Calciumgehalt (Filtrat)	**caf**	g/l	Titration
16.	Calciumgehalt (Spülung)	**cam**	g/l	Titration
17.	Gesamthärte (Filtrat)	**hf**	°dH	Titration
18.	Magnesiumgehlt (Filtrat)	**mgf**	g/l	Titration
19.	Dichte (entgast)	ρ_w	kg/l	Hydrometer oder Spülungswaage
20.	Scheinbare Viskosität	**sv**	mPa * s	Rotations-Viskosimeter (Fann)
21.	Plastische Viskosität	**pv**	mPa * s	Rotations-Viskosimeter (Fann)
22.	10-sec. Gelstärke	gst_1	dPa	Rotations-Viskosimeter (Fann)
23.	10-min. Gelstärke	gst_2	dPa	Rotations-Viskosimeter (Fann)
24.	Thixotropie	**tix**	dPa	Rotations-Viskosimeter (Fann)
25.	Binghamsche Fließgrenze	τ_{bing}	dPa	Rotations-Viskosimeter (Fann)
26.	Fließkurven		dPa	Rotations-Viskosimeter (Fann)
27.	Filterkuchentextur	**fkt**	qualitativ	optisch
28.	Feststoffgehalt (Retortentest)		Vol-%	Fann-Ministill
29.	Emulsionsstabiltität		Volt	Emuls.Stability-Tester
30.	Chloridgehalt (Filtrat)		g/l	Titration

Bestimmung der Dichten

- Messung der „scheinbaren“ Dichte mittels Hydrometer (Aräometer) oder API-Spülungswaage, Messgenauigkeit ± 0,01 g/ml
- Hydrometer vor jeder Messung mit dem Wasser kalibrieren, in welchem es schwimmt (Blindwert ist ggf. abzuziehen)
- Mindestens drei Messungen für ein Ergebnis nötig
- Für Untersuchung gashaltiger Spülungen Zusatzgerät zur Entgasung verwenden („wahre Dichte“)
- Richtwert: < 1,10 kg/l
- Beachte:
  - Ungenauigkeit durch zufälliges Erfassen unterschiedlicher Mengen an Bohrklein bzw. Gas- und Luftgehalten
  - Überschlägige Bestimmung mittels Wägung als Notmaßnahme möglich

Bestimmung der Dichten



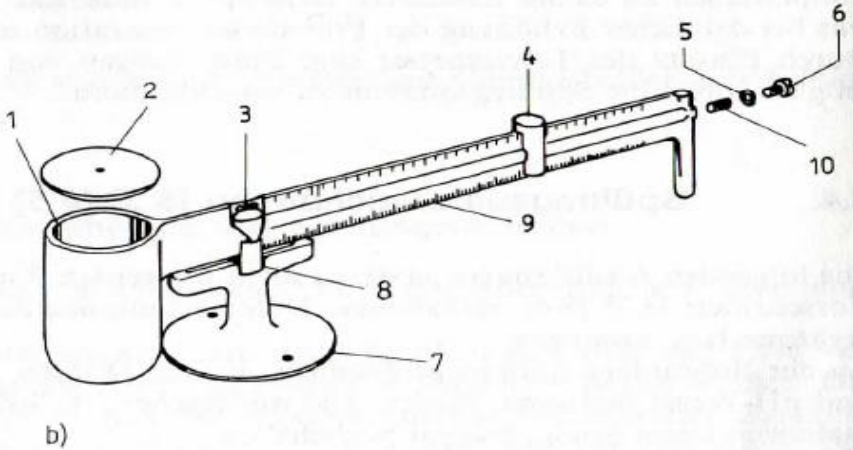
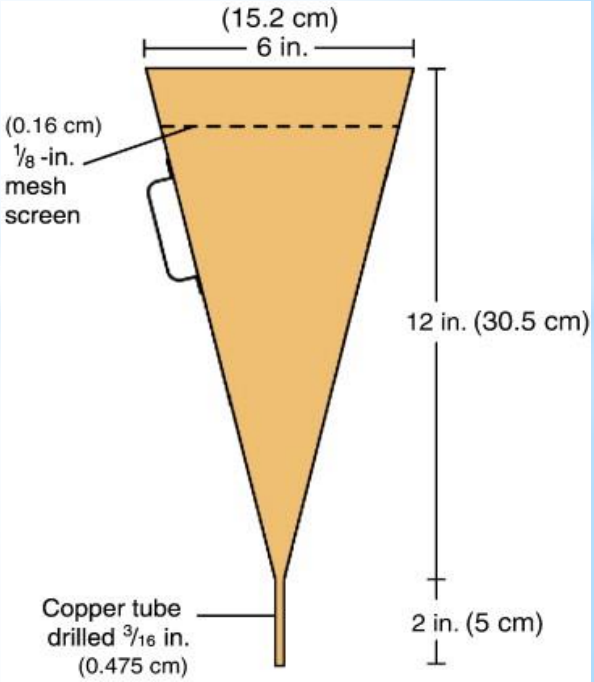


Bild 8.18. Geräte zur Bestimmung der Spülungsdichten
a) Hydrometer, b) Spülungswaage
1 Meßgefäß, *2* Meßgefäßdeckel, *3* Libelle, *4* Reiter, *5* Dichtungsring, *6* Verschlußschraube, *7* Meßgerätefuß, *8* Stütze, *9* Balancearm, *10* Eichschraube

Quelle: W. Arnold, Flachbohrtechnik

Trichterauslaufzeit (TAZ) und Restauslaufzeit (RAZ)

- TAZ ist die Auslaufzeit von 1.000 ml Spülung bei 1.500 ml Einfüllmenge in Sekunden und ist ein annäherndes Maß für das Fließverhalten
- RAZ ist die Auslaufzeit der restlichen 500 ml Spülung in Sekunden
- Verhältnis RAZ/TAZ gibt einen ungefähren Anhalt für die Tragfähigkeit (Gelstärke bzw. Fließgrenze) der Spülung
- Richtwert: TAZ ≈ 38 – 45 s
- Richtwert: RAZ ≈ 28 – 35 s



Rheologische Parameter mittels Rotationsviskosimeter

- Scheinbare Viskosität [sv] = mPas
- Plastische Viskosität [pv] = mPas
- Binghamsche Fließgrenze [τ_{bing}] = dPa
- 10-sec. Gelstärke [gst_1] = dPa
- 10-min. Gelstärke [gst_2] = dPa
- Thixotropie [tix] = dPa

Fließkurve Bentonitspülung

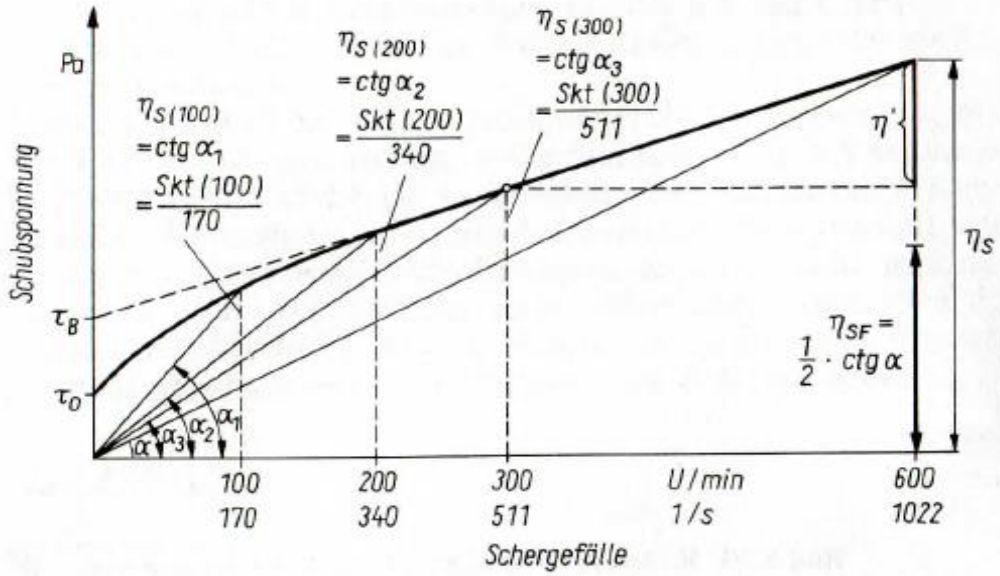


Bild 8.21. Im Rotationsviskosimeter, System FANN, aufgenommene typische Fließkurve einer Bentonitspülung. Eingezeichnet sind die scheinbaren Viskositäten η_S für jede Umdrehungszahl, die nur für das FANN-Gerät definierte »scheinbare« Viskosität η_{SF}, die plastische Viskosität η_B, BINGHAM-Wert τ_B und Fließgrenze τ_0

Gelstärke

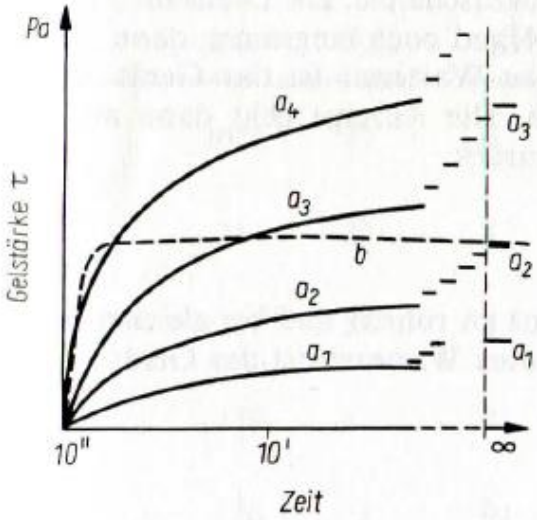


Bild 8.25. Zeitliche Entwicklung der Gelstärken $\tau_{10''}$; $\tau_{10'}$, τ_{∞} von Tonspülungen mit steigenden Tonkonzentrationen (a_1, a_2, a_3, a_4) und nach Salzschädigung (b)

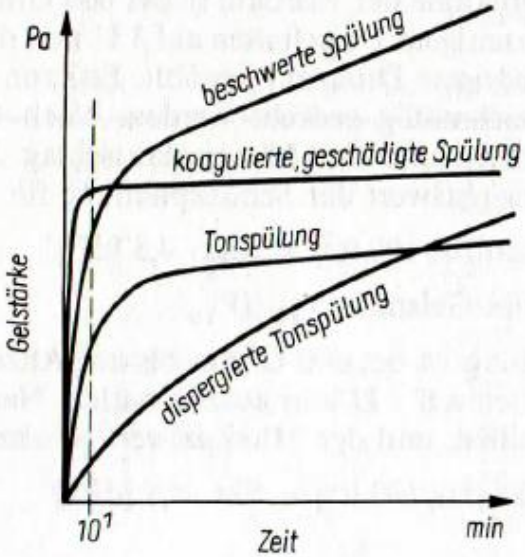


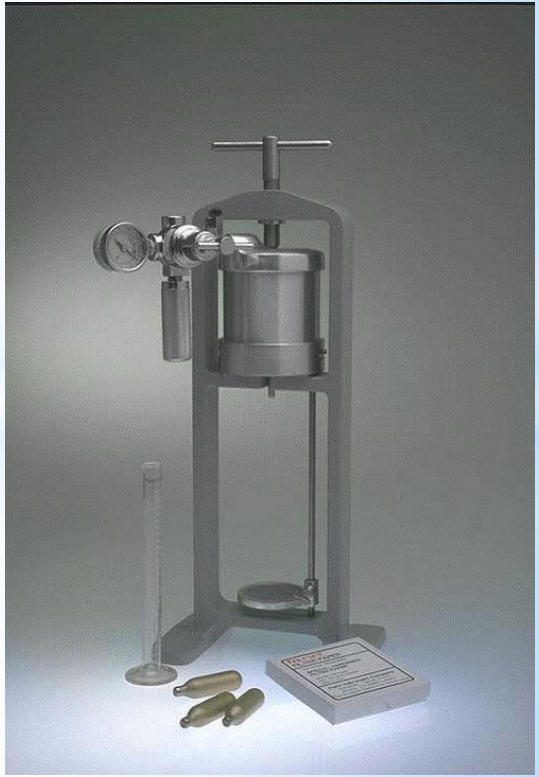
Bild 8.26. Zeitliche Entwicklung der Gelstärken verschiedener Spülungstypen

Filtrat (Fi)

- Filtrat (Fi) früher Wasserabgabe (WA) bezeichnet die unter Verwendung einer API-Filterpresse sowie Einhaltung bestimmter Bedingungen (0,7 MPa / 30 min) aus einer Bohrspülung abgepresste Flüssigkeitsmenge in ml
- Simulation des Differenzdruckes zwischen hydrostatischem Spülungsdruck und Druck der Formationswässer
- Richtwert < 10 ml

Beachte:

- Betrachtung der Statischen Filtration (ruhende Spülung). Im Falle der Dynamischen Filtration (zirkulierende Spülung) wir der FK ständig abgespült, dadurch deutlich höherer Filtratverlust



Filtratabgabe

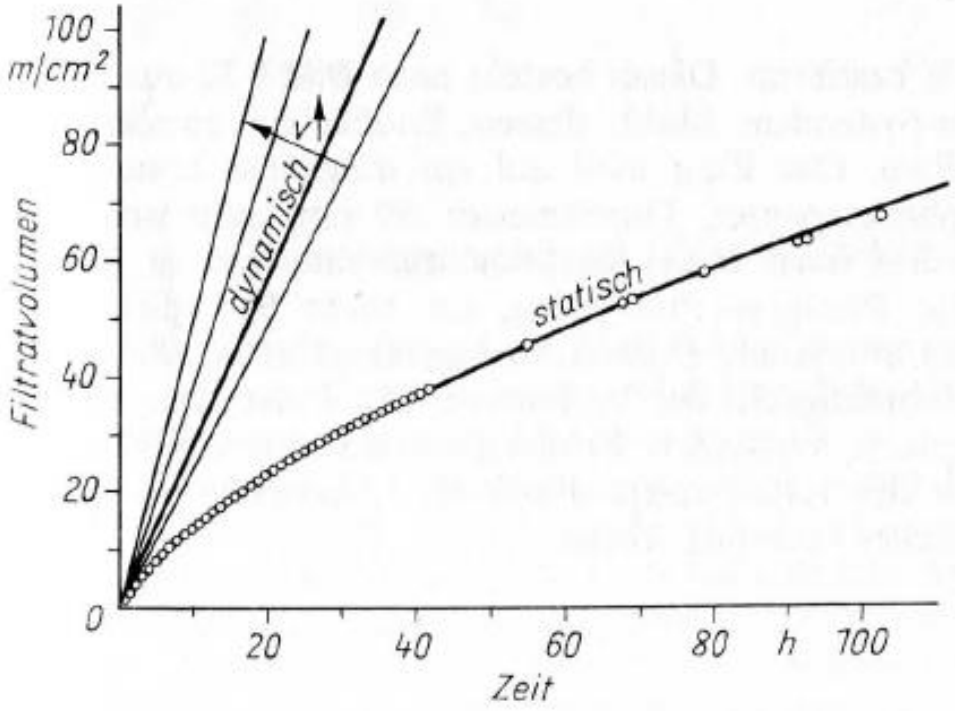


Bild 8.31. Vergleich der dynamischen Filtratabgaben einer Spülung bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten mit der entsprechenden statischen Filtratabgabe

Filterkuchendicke (FK)

- Bohrspülungen mit gutem Wasserbindevermögen bilden in der Regel einen dünnen undurchlässigen möglichst glatt und geschmeidigen Filterkuchen

- Dicke FK können zum Festwerden des Bohrstranges führen, außerdem wird der Fließquerschnitt für die aufsteigende Spülung verkleinert

- Richtwert < 1 mm

Ringwert (Ri)

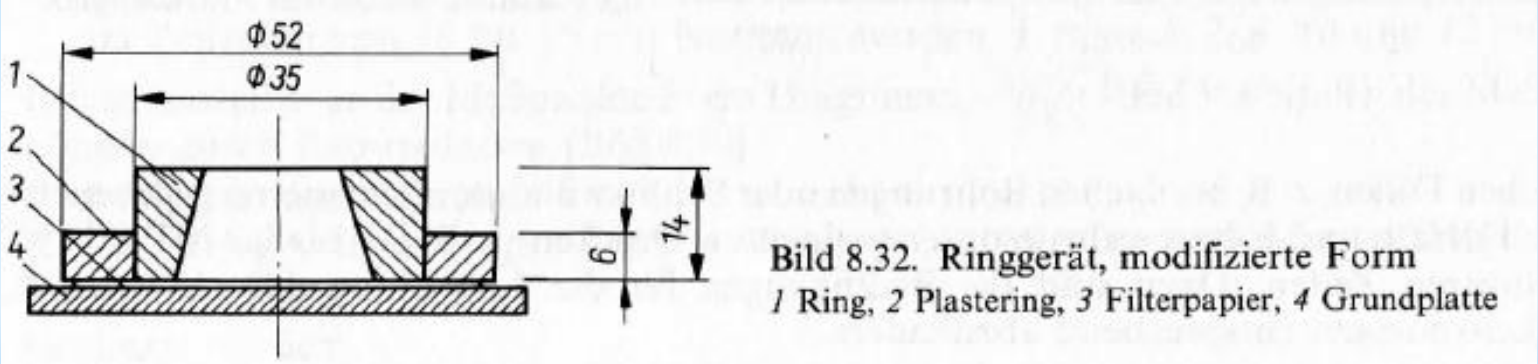
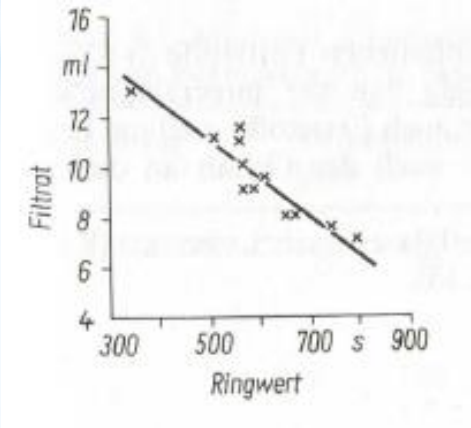


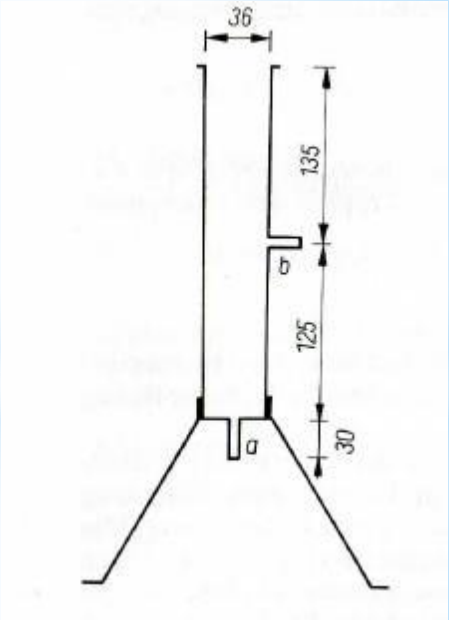
Bild 8.32. Ringgerät, modifizierte Form
1 Ring, *2* Plastering, *3* Filterpapier, *4* Grundplatte

- Messung mittels Ringgerät bzw. – apparat
- Gibt Hinweise auf Filtratwasserabgabe und Filterkuchen
- Ringgerät wird mit aufbereitete Spülung ohne Überstand gefüllt
- Sobald der erste Tropfen das Filterpapier berührt, startet die Zeitmessung
- Ringwert ist die Zeitspanne vom ersten Benetzen des Filterpapiers bis zu dessen vollständigen Aufsaugen
- Richtwert > 1000 s



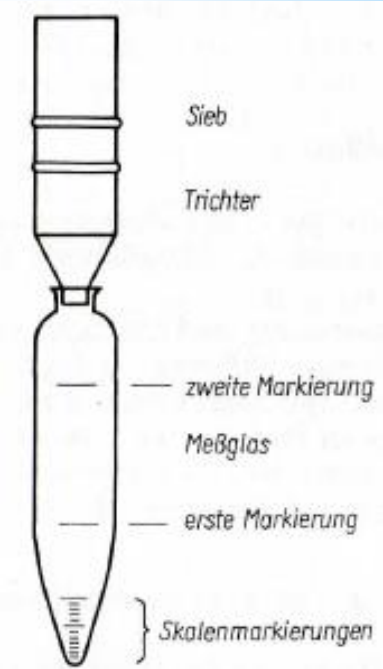
Entmischungsgrad

- Der Entmischungsgrad ist ein Maß für die Fähigkeit von Bohrspülungen grobe, schwere Feststoffe einzubauen
- Das Absinkgefäß hat mit der beladenen Spülung 24 h erschütterungsfrei zu stehen
- Oberer Bereich der Spülungssäule wird über Seitenablass b abgelassen und eine Dichtemessung (B) durchgeführt
- Unterer Bereich der Spülungssäule wird über Bodenablass a abgelassen und eine Dichtemessung (A) durchgeführt
- Entmischungsgrad = A –B in g/cm3



Sandgehalt (Siebmethode nach API)

- Gemessen wird der Anteil an Feststoffen > 63 µm
- Glas bis zur ersten Markierung mit Spülung befüllen
- Wasser bis zur zweiten Markierung und unter verschlossener Öffnung kräftig schütteln
- Glas mehrmals über Sieb entleeren und ausspülen
- Trichter über das Sieb stülpen, umdrehen und mit Ausflussöffnung in das Glas stecken
- Sand mit feinem Wasserstrahl vom Sieb spülen, absetzen lassen und an Skalenmarkierung ablesen



pH-Wert

- Definition: pH = -log c_{H+}
- Maßgebend für die Maximale Ausnutzung des Verteilungsgrades der Bentonite sowie für die optimale Wirksamkeit von Filtratsenkern und Verflüssigern
- Teststreifen bzw. pH-Messgerät
- Optimal pH7 bis pH10
- Ggf. Einsatz von Alkalien (Folie 24)

Bentonitgehalt

- Die nach dem Methylenblautest bestimmte Methylenblaukapazität der Bohrspülung dient als Hinweis auf die Menge des vorhandenen reaktiven Tons (Bentonit und/oder Feststoffe beim Bohren)

- Die Methylenblaukapazität ermöglicht eine Abschätzung der gesamten Kationenaustauschkapazität der Feststoffe in der Bohrspülung

- Bentonitgehalt (kg/m3) = ($ml_{Methylenblaulösung}$/ $ml_{Spülung}$) · 14,25

Bentonitgehalt

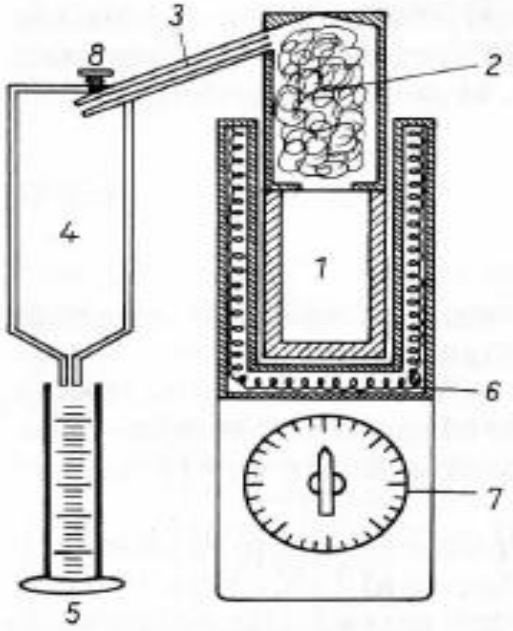


Bild 8.37. Retorte zur Bestimmung des Feststoffgehaltes
1 Aufnahmebehälter für Spülung (z. B. 50 ml), rostfreier Stahl,
2 mit Stahlwolle gefüllter Aufsatz, rostfreier Stahl,
3 Überleitungsröhrchen, *4* Luftkühler (z. B. Aluminium), *5* Meßglas,
6 Heizofen, elektrisch, *7* Schaltuhr, *8* Klemmschraube

Quelle: W. Arnold, Flachbohrtechnik

Feststoffgehalt = Differenz von Spülungsmenge und abdestillierten Flüssigkeiten

Spülungstypen

Grundsätzlich werden unterschieden:

- ***Ansatzrezepturen*** (Herstellung von Spülungen vor Bohrbeginn)
- ***Nachsatzrezepturen*** (zum Auffüllen des ständig zunehmenden Bohrlochvolumens)
- ***Behandlungsrezepturen*** (zur Beherrschung aufgetretener Komplikationen, Regulierung der Spülungsparameter oder Umstellung auf andere Spülungstypen

Wahl der Spülungsmittel bestimmt durch:

- Standfestigkeit des Gestein
- Permeabilität des Untergrundes
- Druckverhältnisse im Untergrund
- Bohrverfahren

Ansatzrezepturen

Nach DVGW Merkblatt W116 werde folgende Empfehlungen gegeben:

Beim Bohren in vorwiegend tonigen Sedimenten:

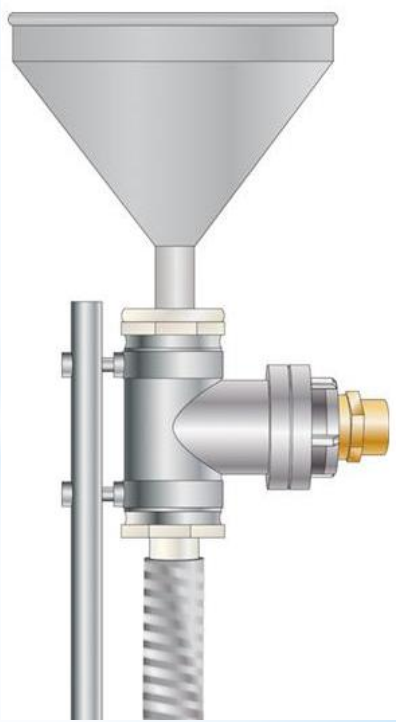
▪	1 m^3	Wasser
▪	2 kg	Rein-CMC
▪ oder	6 kg	Techn.-CMC
▪ oder	2 kg	PAA-hochviskos

Beim Bohren in Wechsellagen Sand/Kies/Ton:

▪	1 m^3	Wasser
▪	20 kg	Bentonit
▪	1,5 kg	Rein-CMC
▪ oder	4 kg	Techn.-CMC-hochviskos
▪ oder	3 kg	PAA-niedrigviskos

Vorbereitung der Spülung

- Sauberes Wasser verwenden
- pH-Wert prüfen
- Spülungs-Injektor verwenden
- Reihenfolge und Mengen der Einzelkomponenten beachten:
  1. Bentonit
  2. Polymer
- Parameter Prüfen und bei Bedarf reagieren

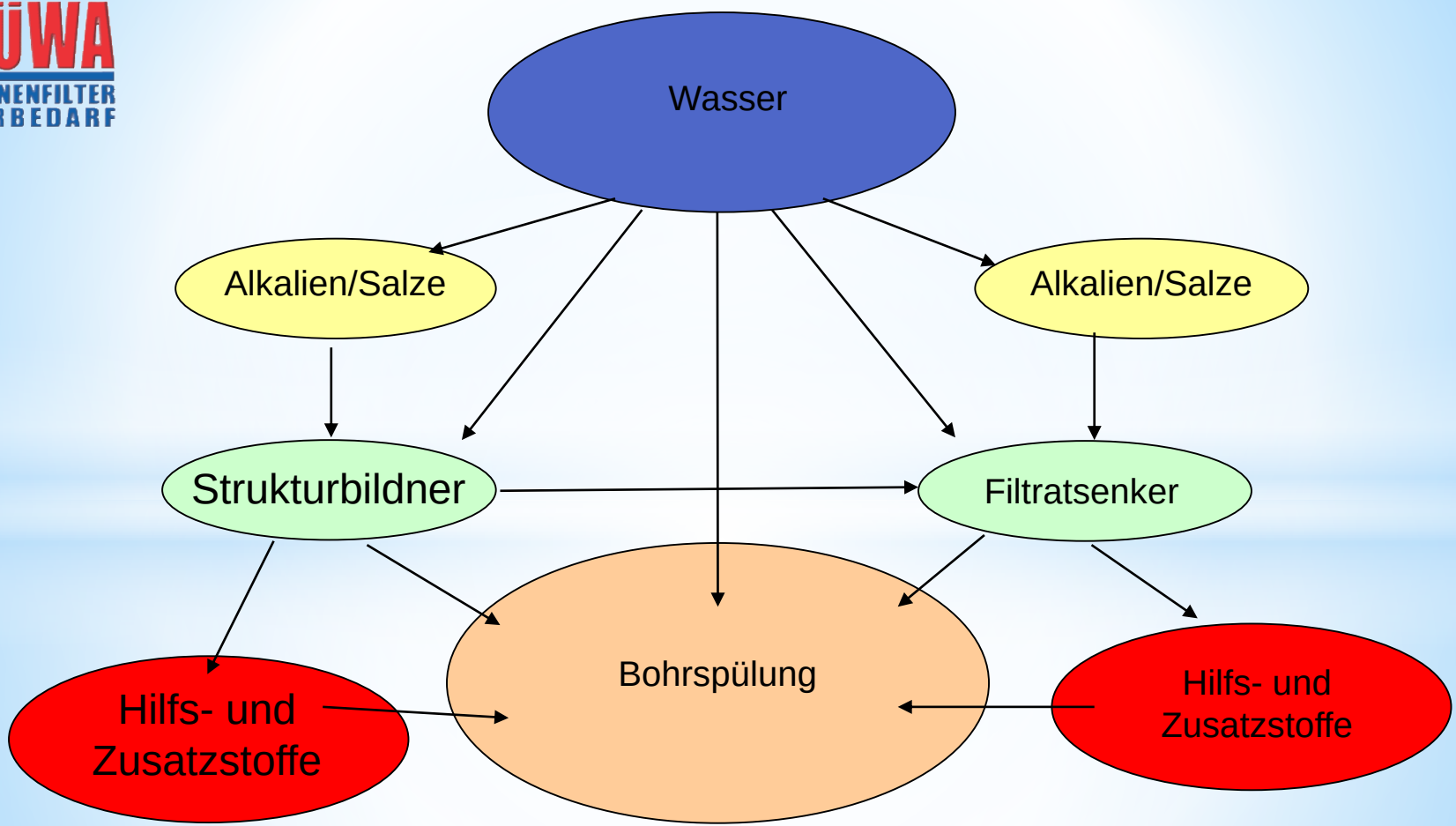


STÜWA-Spülungs-Injektor

Zusammenfassung

Übersicht Eigenschaften Spülungsmittel							
	Bentonit	Rein-CMC HV	techn-CMC HV	techn-CMC LV	HEC Polymer	PAA	Polysac charid
Viskositätserhöhende Wirkung	++	++	++	–	++	++	++
Stabilisierende Wirkung auf Lockersedimente	++	0	0	–	0	–	+
Toninhibierung	–	++	++	0	++	++	++
Salzstabilität NaCl/KCl	–	+	+	+	+	0	0
Salzstabilität Ca^{2+}/Mg^{2+}	–	–	–	–	++	–	–
Temperaturstabilität	+	+	+	+	+	++	–
Biologische Stabilität	++	0	0	0	0	+	–
Wertetabelle: ++ = sehr gut / + = gut / 0 = mäßig / – = schlecht							

Quelle: GWE pumpenboese GmbH


Wasser
Alkalien/Salze
Alkalien/Salze
Strukturbildner
Filtratsenker
Bohrspülung
Hilfs- und Zusatzstoffe
Hilfs- und Zusatzstoffe

STÜWA-Bohrspülungsmittel

Feststrukturbildner

Aktivbentonit:

•IBECO®-B1

Kombiprodukt:

•STÜWAMIX®

Filtratsenker

Polyanionische **C**arboxy-Methyl-Cellulose **PAC**:
•STÜWA-FLOW PAC
•Antisol® FL 30.000

Carboxy-**M**ethyl-**C**ellulose **Na-CMC**:
•HIPERCEL LV
•HIPERCEL HV

Poly**a**cryl**a**mid **PAA**:
•GS 550

Anorganische Zusätze

Alkalien:

•(Soda (Na_2CO_3))

Hilfs- und Zusatzstoffe

Stopfungsmittel:
•Glimmerschuppen
•Nussschalen

Beschwerungsmittel:
•Schwerspat
•Kreide

Spülungsbrecher:
•STÜWA-Clean