

Поглавље 9 - Побољшање стијенских маса. Ињектирање. Консолидационо ињектирање

9.1. Увод

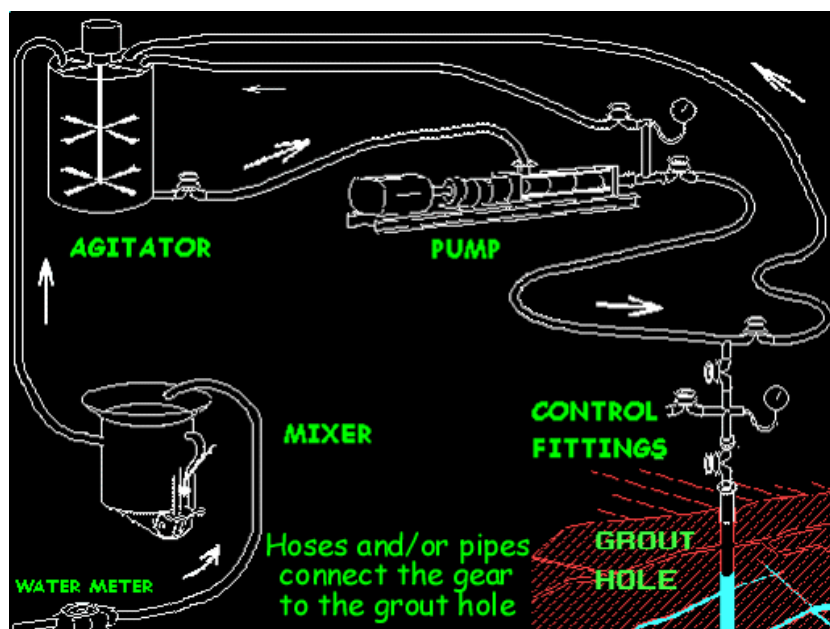
Ињектирање је утискивање ињекционе смјесе – суспензије цемента са додацима у пукотине и шупљине стијенске масе или у међупростор облоге и стијенске масе.

Типови – врсте ињектирања:

- Контактна ињектирање на споју бетона и стијенске масе
- Везно ињектирање се користи за повезивање у конструктивну цјелину облоге и стијенске масе (садејство)
- Консолидационо ињектирање за постизање потребног модула деформабилности стијенске масе, смањење хетерогености, анизотропности и водопрпусности стијенске масе.
- Напонско ињектирање – преднапрезање бетонске облоге и зоне ослобађања напона.

Технолошки поступак:

- материјали: цемент, вода, додаци (активни и инертни)
- опрема: бушилице, пумпе, компресори, мјешалице, агитатори, бункери-силоси, ињектори, цијеви, бртве (пакери), манометри.
- радни циклус: бушење, испирање водом и ваздухом под притиском, тестирање водопрпусљивости етаже, припрема смјеше за ињектирање, утискивање под притиском у етажу, одржавање притиска до стврдњавања.

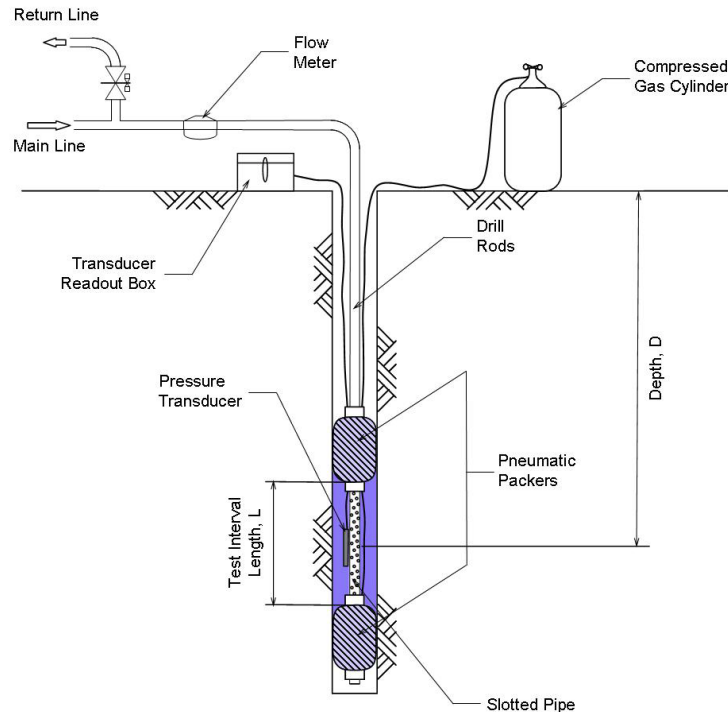


Слика 9.1: Опрема за ињектирање (Houlsby)

9.2. Испитивање водопрпусљивости стијенске масе – Лижонов опит(*Lugeon, 1933*)

Ради се о теренском опиту водопрпусљивости стијенске масе при константном притиску. Тест се спроводи на дијелу бушотине тзв. етажи која је изолвана коришћењем пнеуматских

гумених пакера (бртви). Прије почетка текста одређује се максимални опитни притисак P_{max} тако да не пређе бочни напон σ_3 на одговарајућој дубини.



Слика 9.2: Диспозиција за Лижонов тест

Тест се спроводи у 5 фаза (етапа), са одговарајућом вриједношћу притиска воде за сваку фазу. У оквиру једне фазе се пумпањем одговарајуће количине воде одржава константан притисак воде у времену од 10 минута. У првој фази се одржава низак притисак који се у свакој наредној фази повећава до максималне вриједности P_{max} .

Табела 9.1. Типична висина притиска за поједине фазе теста водопропустљивости

Test Stage	Description	Pressure Step
1 st	Low	$0.50 \cdot P_{MAX}$
2 nd	Medium	$0.75 \cdot P_{MAX}$
3 rd	Maximum (peak)	P_{MAX}
4 th	Medium	$0.75 \cdot P_{MAX}$
5 th	Low	$0.50 \cdot P_{MAX}$

Након достизања максималне вриједности, на исти начин се притисак у следежим фазама смањује. Током једне фазе теста, сваког минута се мјере притисак воде P и проток q . Просјечне вриједности ових величина се користе за мјерење водопропустљивости у свакој фази. Водопропустљивост се изражава кроз јединицу једна лижон 1 LUG који се емпиријски дефинише као проток од једног литра по минути по метру дужном тестиране етаже при референтном притиску од 1MPa:

$$1 \text{ LUG} = q/L \cdot P_0/P$$

гдје је q [lit/min], L [m], P [MPa], $P_0=1 \text{ MPa}$

При идеалним условима (хомогена и изотропна средина) 1 LUG је еквивалентан $1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$.

Табела 9.2. Веза водопропустљивости и услова испуцалости стијенске масе

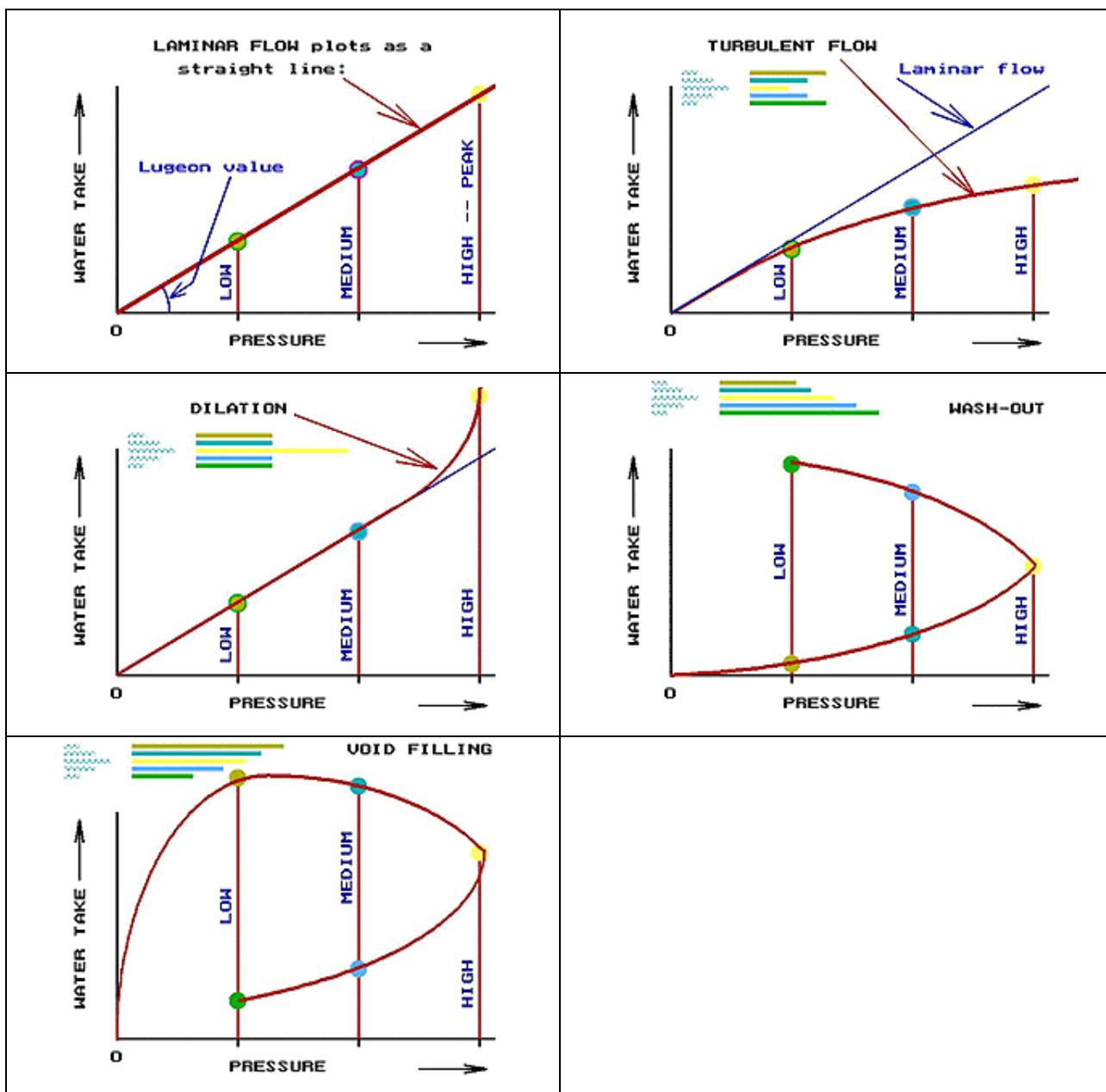
Lug	Класификација водопропустљивости	Опсег пропустљивости (hydraulic conductivity) cm/sec	Опис пукотина
<1	Врло ниска	$<1 \times 10^{-5}$	Врло стиснуте
1-5	Ниска	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Стиснуте
5-15	Умјерена	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Поједине дјелимично отворене
15-50	Средња	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Неке отворене
50-100	Висока	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Многе отворене
>100	Врло висока	$>1 \times 10^{-3}$	Отворене на блиском растојању или шупљине

Када се једном утврде вриједности водопропустљивости за сваку фазу, репрезентативна вриједност се усваја на основу у тесту уоченог тренда промјене водопропустљивости према доњој табели. Резултати посредно описују режим тока воде и карактеристике дисконтинуитета.

Табела 9.3. Карактеристични резултати теста водопропустљивости

ПОНАШАЊЕ	притисак по фазама	водопропустљивост по фазама	опис	репрезентативна водопропустљивост
ЛАМИНАРНО			Лижонове вриједности приближно једнаке независно од притиска	средња лижонска вриједност за све фазе
ТУРБУЛЕНТНО			Лижонове вриједности опадају са порастом притиска. Турбулентни ток – стварање вртлога због храпавости пукотина.	Лижонска вриједност која одговара максималном притиску (III фаза)
ДИЛАТАЦИЈА (dilation)			Лижонове вриједности варирају сразмјерно притиску. Дилатација. ширење прелина под притиском.	Најнижа лижонска вриједност која одговара ниском или средњем притиску воде (I, II, IV, V фаза)
ИСПИРАЊЕ (wash-out)			Лижонска вриједност расте из фазе у фазу због прогресивног испирања пукотинске испуне.	Највећа лижонска вриједност која одговара V-ој фази

<p>ИСПУЊАВАЊЕ ШУПЉИНА (void filling)</p>			<p>Лижонова вриједност опада из фазе у фазу због прогресивног испуњавања шупљина или се јавља бубрење.</p>	<p>Лижонова вриједност која одговара V-ој фази</p>
------------------------------------------	--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------



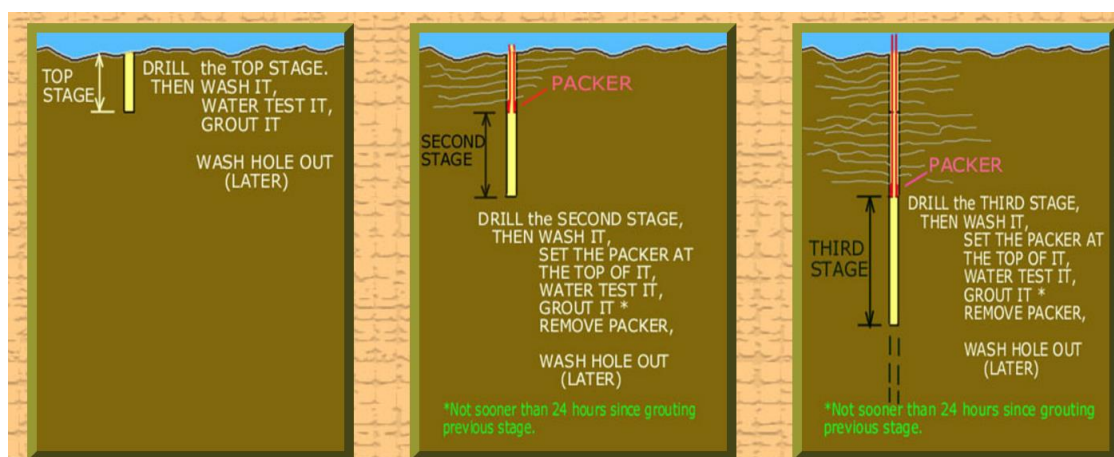
Слика 9.1: Карактеристични резултати теста водопропустљивости – криве проток (water-take) -притисак (Houlaby)

9.3. Процес ињектирања

9.3.1. Поступци при ињектирању

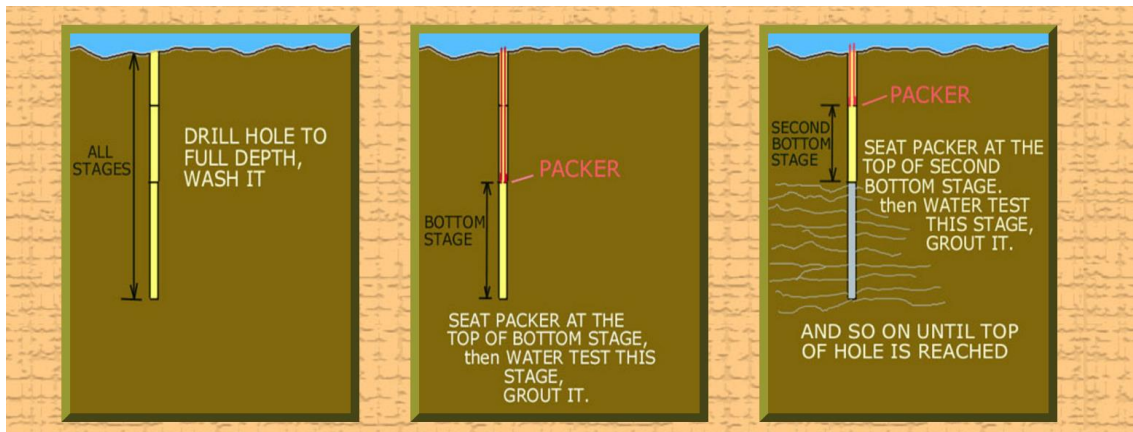
- Силазни поступак са пакерима (*downstage with packer*)
- Узлазни поступак (*upstage*)
- Комбиновани поступак

Силазни поступак се примјењује у стијенским масама које су трошне, јако испуцале и у којима се зидови бушотина зарушавају. Горњи већ заињектирани дјелови стијене представљају ослонац за даље ињектирање. Примјењује се и за ињектирање непосредно под објектом и иза тунелских облога. Величина етаже се бира у зависности од испуцалости стијенске масе. За стијенске масе са крупним пукотинама износи 2-5м а са ситним и до 10м. У случају недовољно проучене испуцалости усваја се дужина етаже од 4-6м. Ово подразумијева бушење отворде ињекционе масе у претходно ињектираној зони и продубљивање бушотине до краја наредне етаже. Постиге се висок квалитет ињектирања уз могућност примјене повишених притисака због тога што се испред сваке ињектиране етаже налазе претходно консолидоване зоне. Недостаци силазне методе су губи у времену и средствима због повећаног обима бушења и вишеструког опремања бушотина за бушење и ињектирање.



Слика 9.2: Силазни поступак са пакерима (*Houlsby*)

Узлазни поступак се примјењује у чврстим стијенским масама када је стање испуцалости стијенске масе добро проучено и када се не очекује зарушавање бушотине. Примјена је могућа само ако у бушотини нема континуалних вертикалних пукотина. Уколико постоје пукотине, ињекциона маса би могла да продре изнад затвореног дијела бушотине то би довело до испуњавања цијеле бушотине ињекционом масом. Предност поступка је што се етаже буше одједном а недостатак је у тешкоћи при примјени већих ињекционих притисака. Код консолидационог ињектирања, при дубини до 8м, ињектирање се врши одједном, независно од испуцалости и утврђене водопропустљивости.



Слика 9.3: Узлазни поступак ињектирања (Houlsby)

Комбиновани поступак – бушотине се у горњем дијелу ињектирају силазним поступком док се доњи дио ињектира узлазним поступком. Комбиновани поступак се примјењује и у случајевима када се дуж бушотине значајно мијеша квалитет стијенске масе., тако да се на појединим дјеловима може примијенити узлазни а на појединим се мора примијенити силазни.

Дужина етаже

Под етажом се подразумијева дио бушотине кроз који се у стијенску масу утискује ињекциона маса. Дужина етаже је најчешће 5м док се мање вриједности усвајају ако су зидови бушотине нестабилни, постоји јак прилив подземне воде. При повољним условима дужина етаже се повећава до 10м.

9.3.2. Разређење ињекционих маса

Почетна конзистенција ињекционе масе и њена промјена у току повећања притиска, одређује се експериментално и коригује у процесу ињектирања. Ињектирање треба почети са ријетким ињекционим масама (вода/цемент=6:1) у циљу испитивања гутања ријетке масе у зони ињектирања. Прелаз на густе цементне ињекционе масе (прогушћење) треба вршити постепено, да се не зачепе пукотине непосредно уз бушотину, као и да се омогући продирање цементне масе до пројектног пречника ширења масе од бушотине (радијуса дејства).

9.3.3. Ињекциони притисак

Ињектирање треба изводити при највећем допуштеном притиску. Знак да је ињекциони притисак већи од допуштеног је јако истицање ињекционе масе из бушотине при прекидању ињектирања. Међутим, висок ињекциони притисак је услов квалитета процеса ињектирања и постигнутог ефекта. Ињекциони притисак треба да изазове мале деформације стијенских блокова и мало повећање зева пукотине. Након престанка дејства притиска, зев пукотине се смањује и ињекциона маса очвршћава у пукотинама и порама у условима притиска изазваног повратним деформацијама стијенских блокова односно смањења зева пукотина. У том случају, по завршетку ињектирања из бушотине излази мала количина ињекционе масе. Горња граница ињекционог притиска с емора одредити из услова да не дође до оштећења објекта уз који се ињектира, одизања стијенске масе ако је ињектирање близу површине терена односно хидрауличког расцијепа у стијенској маси.

9.3.4. Критеријум завршетка ињектирања (*refusal criteria*)

Под критеријумом завршетка ињектирања подразумејева се количина ињектиране ињекционе масе у јединици времена (вриједност специфичног гутања ињекционе мас) на дужини од 1 метара бушотине, под завршним максималним ињекционим притиском и изражава се у лижонима ($lit/min/m'$ бушотине / p_{imax}/t минута).

9.4. Састав ињекционих маса

За консолидационо ињектирање испуцалих стијенских маса користе се цементне и цементно-пјешчане ињекционе масе. Цементне ињекционе масе су суспензије цемента у води и спадају у нестабилне ињекционе масе. Почетни однос воде и цемента се креће од 6 до 3 са даљим прогушћавањем (при одсуству) смањења гутања према редоследу 2,1,0.8. Почетна конзистенција цементних ињекционих маса може се орјентационо одредити у зависности од специфичног гутања воде према доњој табели.

Табела 9.4. Почетни однос воде и цемента у функцији од водопропустљивости

VDP(Lu)	1	1-5	5-10	10-20	10-40	>40
v/c	6	5	3	2	1	1

За ињектирање великих отворених пукотина и шупљина тј. при већем специфичном гутању воде (>100 Lu) треба предвидјети коришћење цементне ињекционе масе са додатком пијеска, глине, пепела или других материја који смањују потрошњу цемента. Орјентациони састав цементно-пјешчане ињекционе масе са ситнозрним пијеском се одредити из доње табеле.

Табела 9.5. Количински односи компоненти цементно-пјесковите ињекционемасе у функцији од водопропустљивости

VDP(Lu)	Количински однос компонената по маси		
	цемент	пијесак	вода
10-30	1	0.5	3
30-50	1	1	2
50-100	1	2	1.5

Пијесак треба да је ситнозрн, са честицама које нису веће од 0.50мм, или средњезрн са честицама које нису веће од 2мм у зависности од типа и величине шупљина које се испуњавају. За попуњавање већих шупљина у стијенској маси (нпр. каверни у карсту) справљају се цементно-пјешчане ињекционе масе са већом максималном крупноћом зрна (од 7-8мм).При додавању пијеска у цементну ињекциону масу треба додати и глину, односно бентонит или неки други стабилизатор који спречава сегрегацију пијеска у шупљинама које се ињектирају.

Пуцолани и згуре имају улогу пунила и активних додатака у циљу повећања отпорности ињекционих маса у агресивној средини.

Бентонит је fino дисперзована пластична глина углавном састављена од минерала монтморилонита. Лако се диспергује у води и даје стабилне тиксотропне суспензије па се користи при справљању цементних и цементно-пјешчаних ињекционих маса за постизање

њихове стабилности. Додаје се ради спречавања сегрегације, декантације и побољшања услова течења.

Активни додаци:

- убрзивачи (електролити)
- стабилизатори
- пластификатори

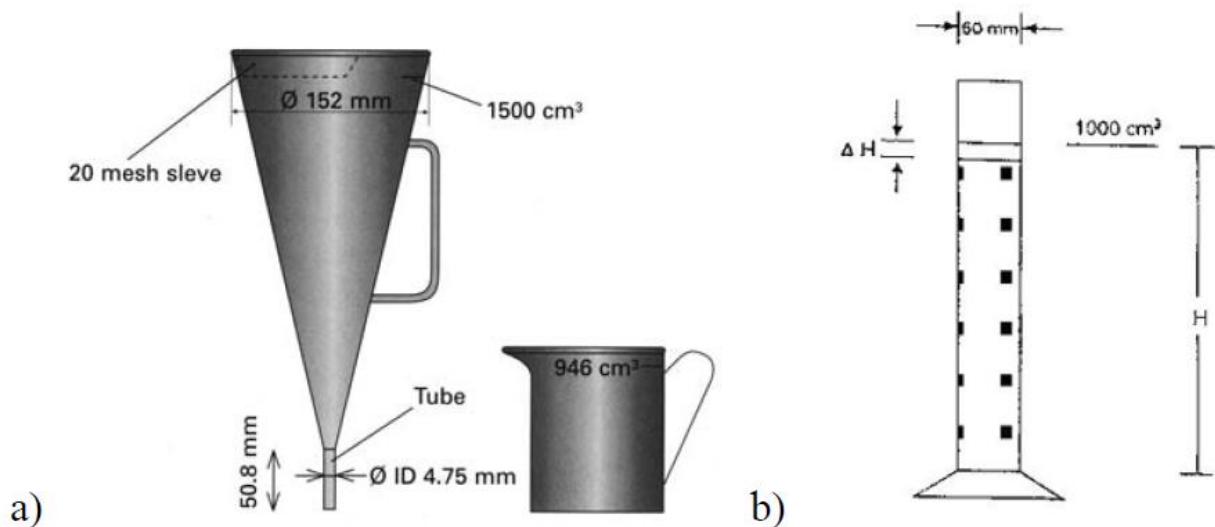
Убрзивачи се примјењују у циљу убрзавања процеса везивања цемента што је рецимо код консолидационог ињектирања случај при брзом кретању подземних вода.Највише се користи калцијум-хлорид који се додаје у количини 3-6% суве супстанце у односу на количину цемента. Користе се још водено стакло и каустична сода.

Стабилизатори се користе за повећање стабилности и побољшање реолошких својстава ињекционих маса. Најчешће се користе пластичне глине и бентонити.

Пластификатори су активни додаци који повећавају флуидност ињекционе масе. То су површински активне материје, хидрофилне (сулфитна цеђ-сулфолигнини) и хидрофобне (материје сродне сапуницама).

Вискозност ињекционе масе се одређује коришћењем Marsh-овог лијевка (*Marsch funnel*). Лијевак се прво напуни са 1.50 литром ињекционе масе. Мјерна посуд запремине 946 ml (1 US quart) се напуни из стандардног лијевка при чему се забиљежи вријеме пуњења. Чиста вода има вријеме истицања од 26 секунде (1 US quart) односно 28 секунди за 1 литар. Погодна вриједност за ињекциону масу је од 32-35 секунди.

Стабилност ињекционе масе се мјери сипањем исте у мензурку запремине 1000 ml. Након 2 сата, мјери се висина издвојене воде ΔH . При строгом критеријуму проценат седиментације $\Delta H/H$ би требао да је $<2\%$. Суспензија се сматра стабилном ако је $\Delta H/H < 5\%$ након 2 часа.



Слика 9.4: а) Маршов лијевак за испитивање вискозности, б) декантација-испитивање стабилности ињекционе масе (bleeding test)