Rodzaje wód występujących w gruncie

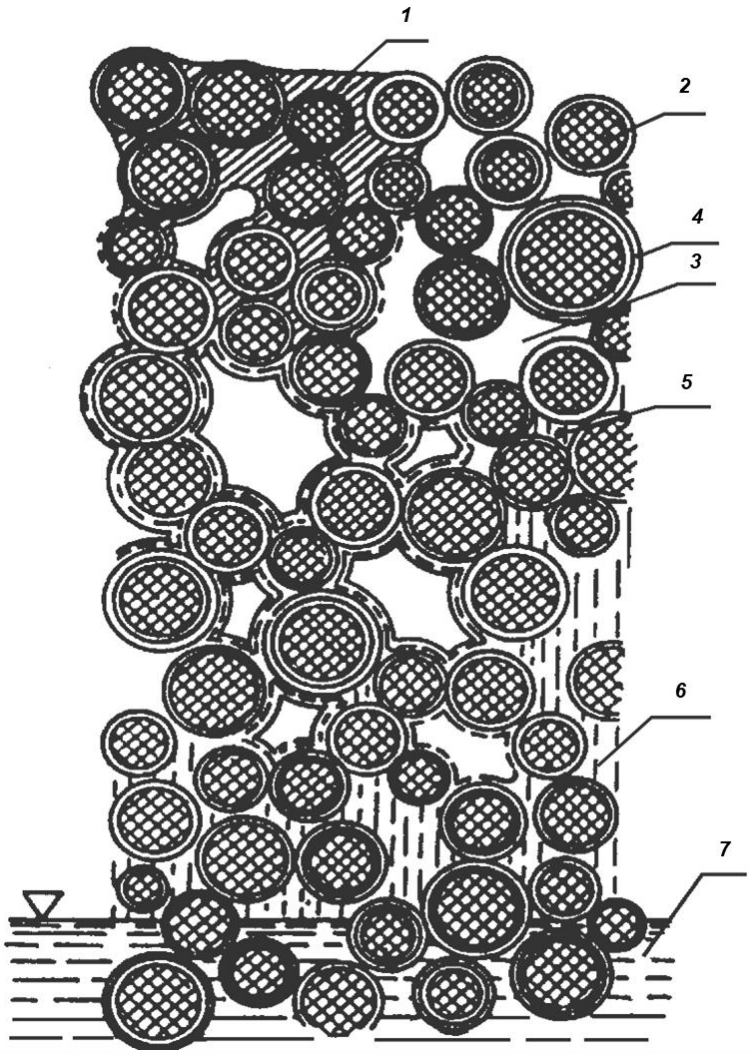
Rodzaje wody w gruncie klasyfikuje się na podstawie jej stanu skupienia (stały, ciekły, gazowy), ruchliwości i wzajemnego oddziaływania na cząstki gruntowe. Przyjmuje się, że w podłożu gruntowym występuje woda:

- **w postaci pary**
- **związana:**
  - **silnie związana – higroskopijna**
  - **słabo związana – błonkowata**
- **wolna:**
  - **gruntowa**
  - **wsiąkowa**
- **kapilarna (włoskowata)**
- **w stanie stałym**
- **krystalizacyjna i chemicznie związana**

Rodzaje wód występujących w gruncie

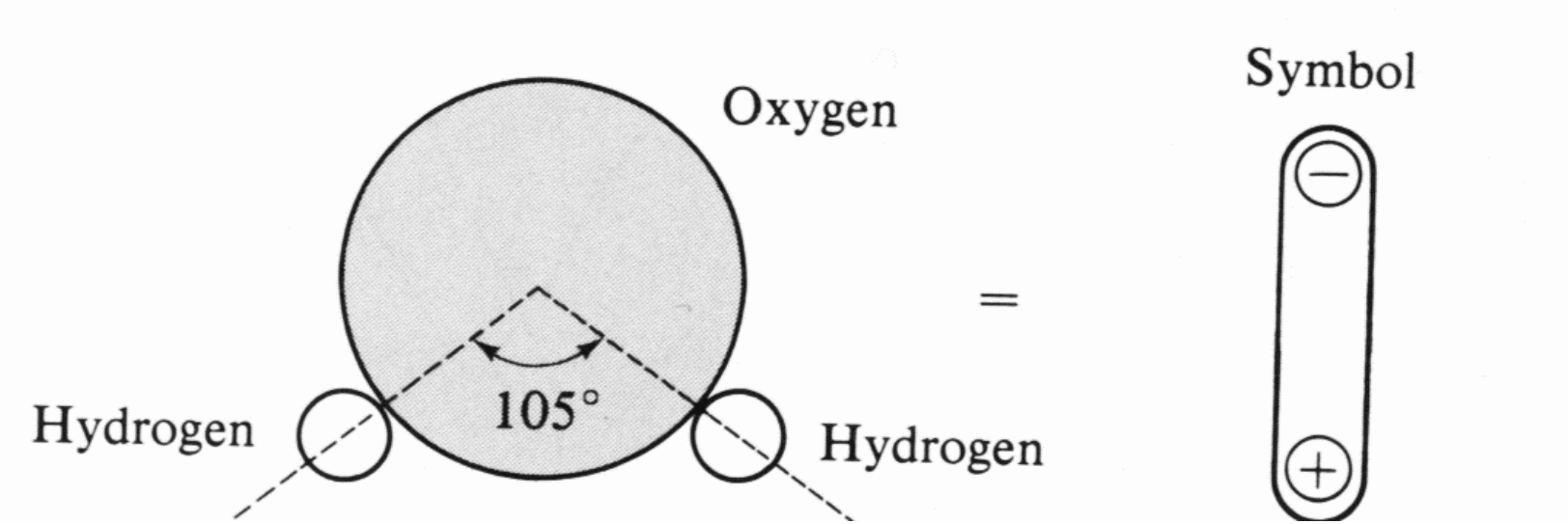
Schemat występowania różnych rodzajów wód w gruncie:

1. **woda opadowa przesiąkająca,**
2. **cząstka gruntu,**
3. **powietrze, para wodna lub CO_2,**
4. **woda związana higroskopowa i błonkowata,**
5. **woda włoskowata zawieszona,**
6. **woda włoskowata zamknięta,**
7. **woda gruntowa.**



Wody związane

Dlaczego woda jest związana z gruntem?



Woda związana

Woda związana otacza cząstki gruntu w postaci warstw, które są przyciągane przez grunt z różną siłą. Dzieli się na silnie związaną i słabo związaną.

Rozkład sił jednostkowych przyciągających wodę związana:

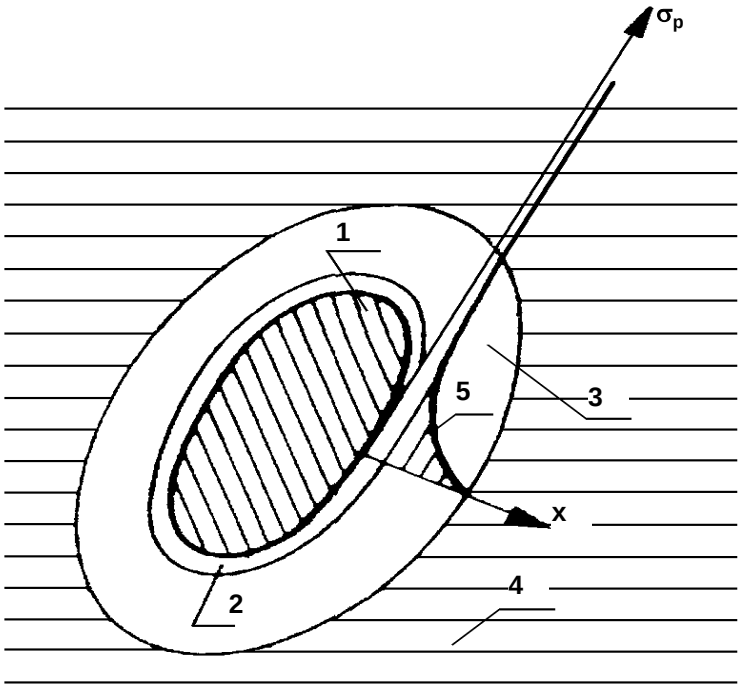
1 – cząstka stała,

2 – woda adsorpcyjna (higroskopijna),

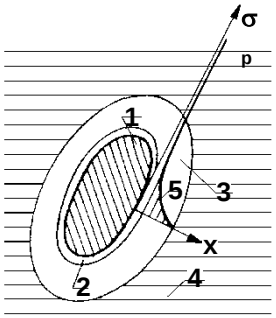
3 – woda błonkowata,

4 – woda wolna,

5 – wykres sił przyciągania molekularnego

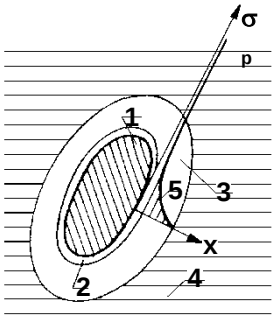


Woda silnie związana



Woda silnie związana – higroskopowa (adhezyjna, adsorbowana) jest silnie połączona z powierzchnią cząstek gruntowych. Tworzy powłokę – warstwę **kationów** trwale związanych z powierzchnią cząstki gruntu na skutek przyciągania molekuł wodnych. Nie może działać rozpuszczająco, przechodzić z jednej cząstki na drugą oraz przekazywać ciśnienia hydrostatycznego. Woda adhezyjna przyciągana jest z ciśnieniem dochodzącym do **2500 MPa**. Ma własności ciała stałego. Jej gęstość dochodzić może do 2400 kg/m^3, a temperatura zamarzania do -78°C. Grubość warstwy wód adsorbowanych od 2 do 10 drobin wody. Do ich całkowitego usunięcia potrzebna jest temperatura 350°C.

Woda błonkowata



Woda błonkowata – woda słabo związana – dzieli się na wodę błonkowatą utwierdzoną i wodę błonkowatą luźną. Jest słabiej związana z powierzchnią cząstki, przesuwa się z jednej cząstki na drugą niezależnie od siły ciężkości do chwili wyrównania grubości wodnej na obu cząstkach.

Woda błonkowa stanowi warstwę o grubości od 20 do 200 drobin wody. Grubość powłoki wody błonkowej wokół ziarn kwarcu o średnicy od 0.1÷0.05 mm wynosi ok. $34 \cdot 10^{-6}$ mm, a dla cząstek 0.01÷0.005 mm – ok. $5 \cdot 10^{-5}$ mm. Zamarza w temperaturze nieco poniżej 0°C. Nie przenosi ciśnienia hydrostatycznego. Łączna grubość wód związanych na powierzchni cząstek iłowych może dochodzić do 0.001 mm, a więc może przekraczać wymiar samej cząstki, a tym samym wszystkie wolne przestrzenie. Wpływ wody związanej na własności fizyczne i mechaniczne, a głównie na przepuszczalność, ściśliwość, kapilarność jest tym większy, im drobniejsze są cząstki gruntu.

Fizykochemiczne oddziaływanie cząstek gruntowych

Miejscem występowania zjawisk natury fizykochemicznej jest powierzchnia graniczna będąca powierzchnią kontaktu pomiędzy fazą stałą (cząstkami) i fazą ciekłą (wodą lub roztworem różnych związków chemicznych).

Wielkość powierzchni granicznej w przeliczeniu na jednostkę objętości danego gruntu nazywa się powierzchnią właściwą. Im drobniejsze są cząstki danego ośrodka, tym większa jest jego powierzchnia właściwa i tym większa jest jego aktywność fizykochemiczna.

Zjawiska fizykochemiczne mają wpływ na:

- **jakość i pracę gruntu,**
- **strukturę gruntu, ściśliwość i wytrzymałość.**

Intensywność zjawisk zależy od:

- **składu mineralnego ich ziaren i cząstek,**
- **składu chemicznego roztworu wodnego znajdującego się w porach gruntu,**
- **wielkości powierzchni granicznej.**

Wielkość powierzchni właściwej

- **Piasek (ok. 0.5 mm) – 0.004 m^2/g**
- **Kaolin – 80 m^2/g**
- **Glaukonit – 400 m^2/g**
- **Czarnoziem – 440÷990 m^2/g**
- **Bentonit – 1300÷1390 m^2/g**

Jony w gruncie

Każda cząstka gruntowa otoczone jest nie tylko molekułami wody, ale i jonami (kationami (+) lub anionami uwodnionymi (-)), które równoważą elektrostatycznie jony utwierdzone na powierzchni cząstki gruntowej.

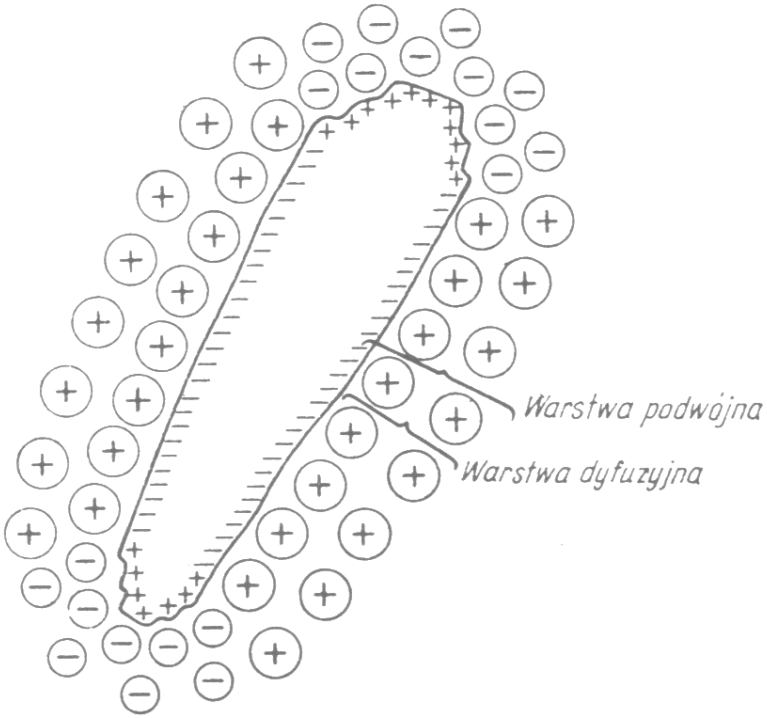
Najczęściej na powierzchniach bocznych cząstek gruntowych utwierdzone są kationy a w narożach aniony. Dookoła każdej cząstki występuje warstwa dyfuzyjna, zbudowana z absorbowanych, uwodnionych kationów lub anionów.

Jony w gruncie

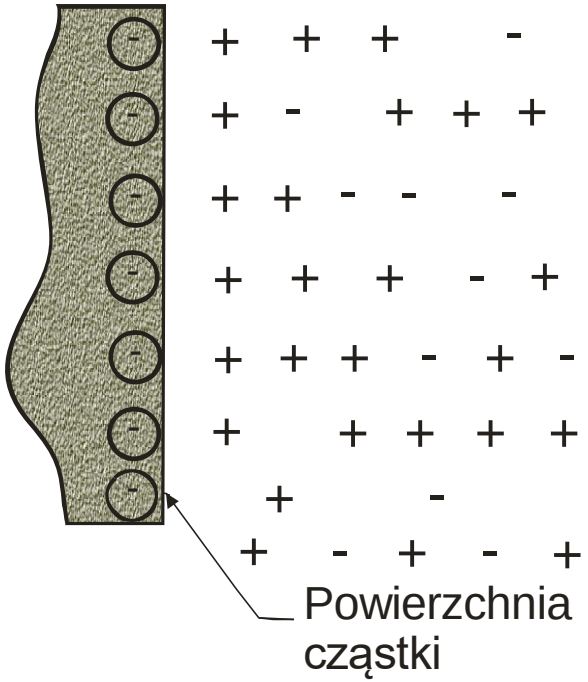
Warstwa podwójna jonowa jest to warstwa jonów utwierdzonych na powierzchni cząstki i warstwa dyfuzyjna z adsorbowanych jonów.

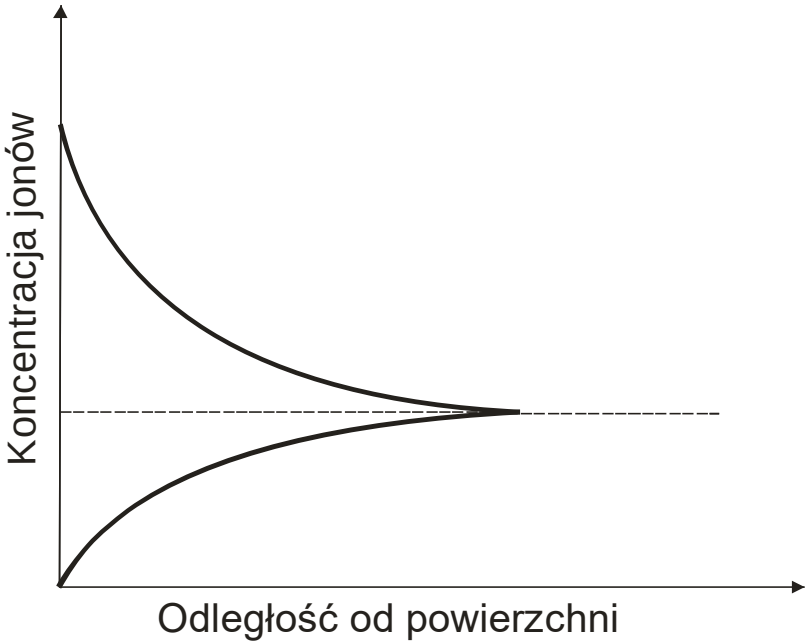
Grubość warstwy podwójnej i warstwy wody związanej zależy od:

- **składu chemicznego cząstki stałej**
- **wartościowości adsorbowanych jonów.**



Jony w gruncie

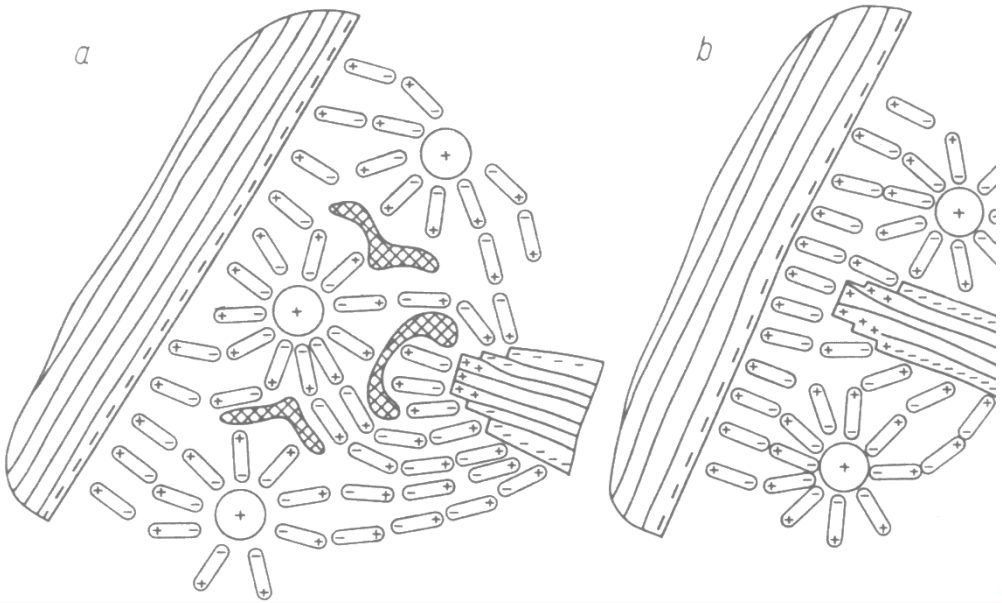




Jony w gruncie

Cząstki gruntowe mogą być ułożone prostopadle lub równolegle do siebie.

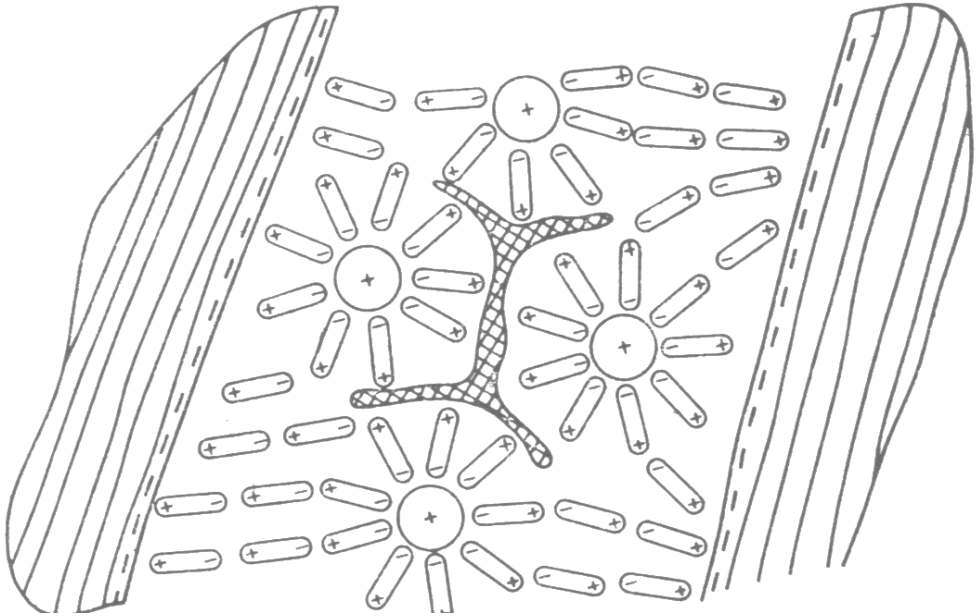
Przy ułożeniu prostopadłym istnienie warstwy kationów osłabia przyciąganie cząstek (rys. a). Pojawiają się strefy odpychania molekuł wodnych (strefy zakreskowane). Przy większej liczbie warstw kationów wzajemne przyciąganie cząstek jeszcze bardziej maleje.



Jony w gruncie

Przy równoległym ułożeniu cząstek siły ich wzajemnego przyciągania są osłabione na skutek istnienia na bocznych powierzchniach znacznych stref odpychania się molekuł wodnych (strefy zakreskowane).

Grunty o równoległym układzie cząstek wskazują znacznie większą zdolność do pęcznienia.



Jony w gruncie

Na siłę przyciągania i odpychania cząstek gruntu ma wpływ:

- **obecność lub brak warstwy kationów między cząsteczkami (jedna warstwa kationów osłabia wzajemne przyciąganie cząstek, a każda kolejna powoduje, że przyciąganie cząstek jeszcze bardziej maleje.)**
- **wartościowości kationów adsorbowanych (im większa wartościowość kationów, tym mniej jest ich w warstwie dyfuzyjnej, tym lepsze właściwości mechaniczne ma grunt)**

Fizykochemiczne oddziaływanie cząstek gruntowych

- **Iły zawierające kationy sodu mają dużą nasiąkliwość wody i wykazują znaczne pęcznienie. Po wymianie na kationy o wyższej wartościowości (np. wapnia), grubość warstwy podwójnej w cząstkach zmniejsza się i iły mniej pęcznieją.**
- **Wymiany kationów używa się do wzmocnienia iłów (wyniki są tym lepsze im wyższa wartościowość wprowadzanych kationów). Wymiany kationów można dokonać elektrochemicznie za pomocą prądu stałego (anody z aluminium, katody z miedzi). Bernatzik uzyskał w ten sposób wzrost kąta tarcia wewnętrznego z 23° do 35° wraz ze znacznym spadkiem ściśliwości.**
- **Jakość kationów i grubość błonek wodnych ma bardzo duży wpływ na wodoprzepuszczalność gruntów – im grubsze są błonki wodne na cząstkach gruntu, tym mniejsza jest jego wodoprzepuszczalność, gdyż coraz większą objętość zajmuje woda błonkowa, mocno związana na powierzchni cząstek.**

Fizykochemiczne oddziaływanie cząstek gruntowych

Grunty o dużej powierzchni właściwej mają zdolność wiązania jonów ciał rozpuszczonych w wodzie przy jednoczesnym oddawaniu do roztworu równoważnej liczby jonów. Wymiana jonów zachodzi w warstwach wody związanej, a także w sieci krystalicznej cząstek. Mechanizm wymiany jonów (kationów) zależy od charakteru sieci krystalicznej minerałów.

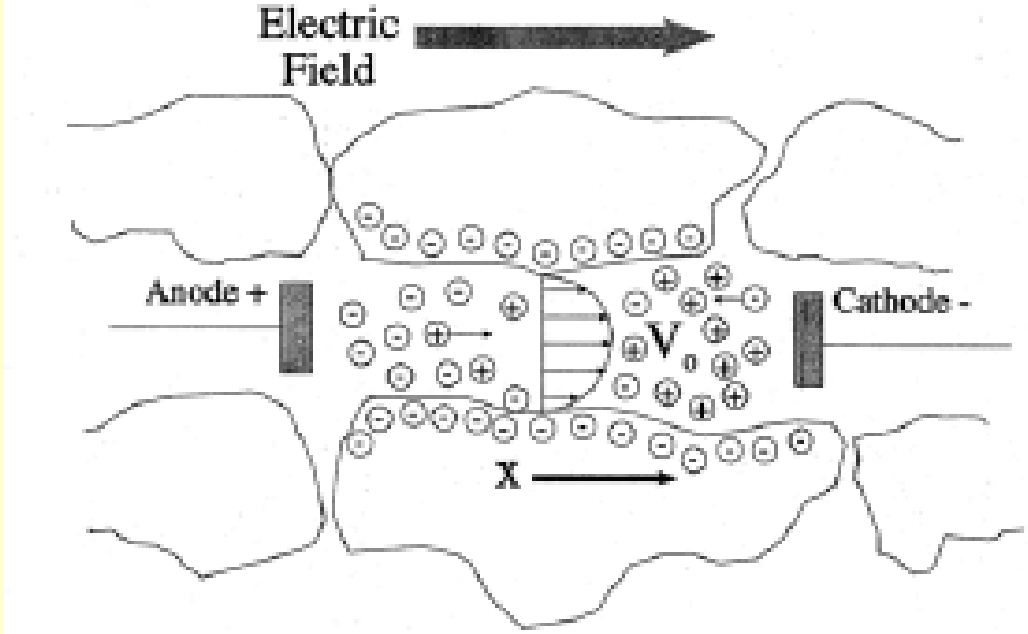
Pojemność wymienna jonów jest to liczba wymiennych jonów, wyrażonych w miliwalentach na 100 gramów suchej masy gruntu.

Pojemność wymienna gruntów mieści się w granicach 0÷100 mwal/100g. Przykładowo, dla minerałów iłowych wynosi ona:

Kaolinit	**3÷15 mwal/100g**
Illit	**20÷40 mwal/100g**
Montmorylonit	**60÷100 mwal/100g**

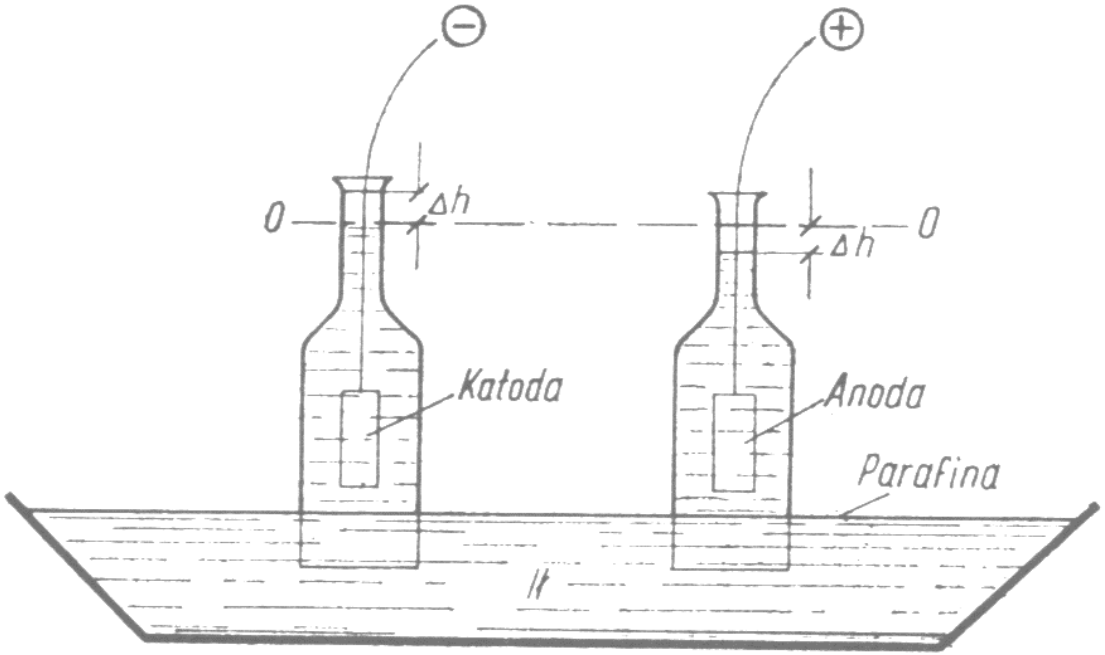
Zjawiska elektrokinetyczne

Przepływ elektroosmotyczny jest to przemieszczenie pewnej części warstwy dyfuzyjnej kationów, stycznie do warstwy utwierdzonej, pod wpływem stałego prądu elektrycznego. Nastąpi więc przepływ wody w kierunku elektrody o przeciwnym znaku.



Zjawiska elektrokinetyczne

Elektroforezą lub elektrokataforezą nazywamy wędrówkę cząstek stałych, mających potencjał elektrokinetyczny, do elektrody odmiennego znaku. Zjawisko to zostało odkryte przez Reussa w 1809 r.



Zjawiska elektrokinetyczne

Zjawiskiem odwrotnym do elektroosmozy jest potencjał przepływu. Został on odkryty doświadczalnie przez Quincke, który przepuszczał wodę destylowaną przez różne grunty i uzyskał w obwodzie zamkniętym prąd elektryczny o napięciu 6.9 V dla piasku kwarcowego i 0.4 V dla gliny.

Przepływ elektroosmotyczny jest to przemieszczenie pewnej części warstwy dyfuzyjnej kationów, stycznie do warstwy utwierdzonej, pod wpływem stałego prądu elektrycznego. Nastąpi więc przepływ wody w kierunku elektrody o przeciwnym znak

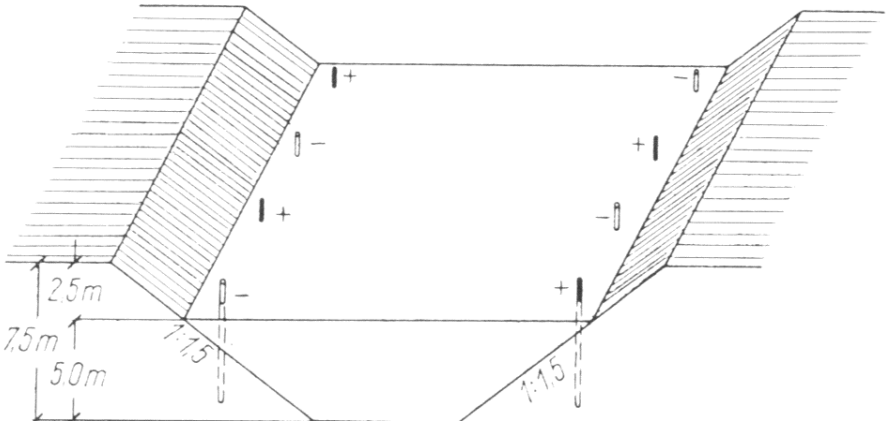
Zjawiska elektrokinetyczne

Elektroosmozę można wykorzystać np. do osuszania gruntu, jego wzmocnienia lub uszczelnienia.

W Polsce stosowano elektroosmozę do wzmacniania i uszczelniania piasków przez kilkukrotne wprowadzenie roztworów szkła wodnego oraz chlorku wapnia. Elektroosmoza zapewnia przenikanie roztworu do porów bez potrzeby stosowania dużych ciśnień (jak przy iniekcjach); dłuższe stosowanie prądu przyśpiesza proces twardnienia żelu krzemionki.

Zjawiska elektrokinetyczne

Zastosowanie elektroosmozy daje dobre wyniki przy osuszaniu gruntów pylastych i ilastych o małej wodoprzepuszczalności. Przy zastosowaniu prądu elektrycznego o spadku napięcia 1 V/cm uzyskuje się prędkość przepływu wody około $5x10^{-5}$ cm/s, a więc 10÷10000 razy większą od przepływu hydraulicznego.



Anoda - pręty stalowe

Katoda – aluminiowe rury perforowane

Prąd stały – 90 V

Wydajność z 20 studzienek – 2.5 m^3/h

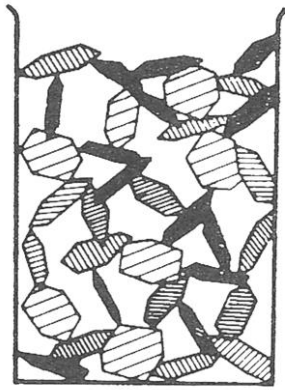
Grunt zmienił się z miękko-plastycznego w półzwarty

Osuszanie piasków tą metodą jest bezskuteczne, gdyż mają one większą wodoprzepuszczalność.

Zjawisko tiksotropii

Zjawisko tiksotropii – polega na przechodzenia żelu w zol i odwrotnie, wskutek mechanicznych oddziaływań (wibracji, wstrząsów, mieszania, działania ultradźwięków itp.). W tworzeniu się żelu udział biorą wszystkie cząstki zawiesiny, z których po pewnym czasie powstaje ciągła struktura komórkowa.

Właściwości tiksotropowe mają grunty zawierające cząstki iłowe o rozmiarach koloidów < 0.0002 mm.



Cząstki iłowe i koloidalne tworzą pomiędzy większymi ziarnami tiksotropowe spoiwo w postaci ciągłej siatki przestrzennej, nadają gruntowi spoistość i wytrzymałość. Naruszenie struktury triksotropowej spoiwa gruntu wskutek drgań i wibracji powoduje uplastycznienie gruntu, a nawet jego upłynnienie.

Zjawisko tiksotropii
Niigata, 1964

Upłynnienie gruntów (Soil Liquefaction)

Jest to utrata nośności (wytrzymałości) gruntów piaszczystych lub pylastych pod wpływem obciążeń dynamicznych (drgań).

Czynniki sprzyjające upłynnianiu:

- **drobnoziarnistość,**
- **równoziarnistość,**
- **stopień zagęszczenia (luźne lub średniozagęszczone),**
- **zawodnienie.**

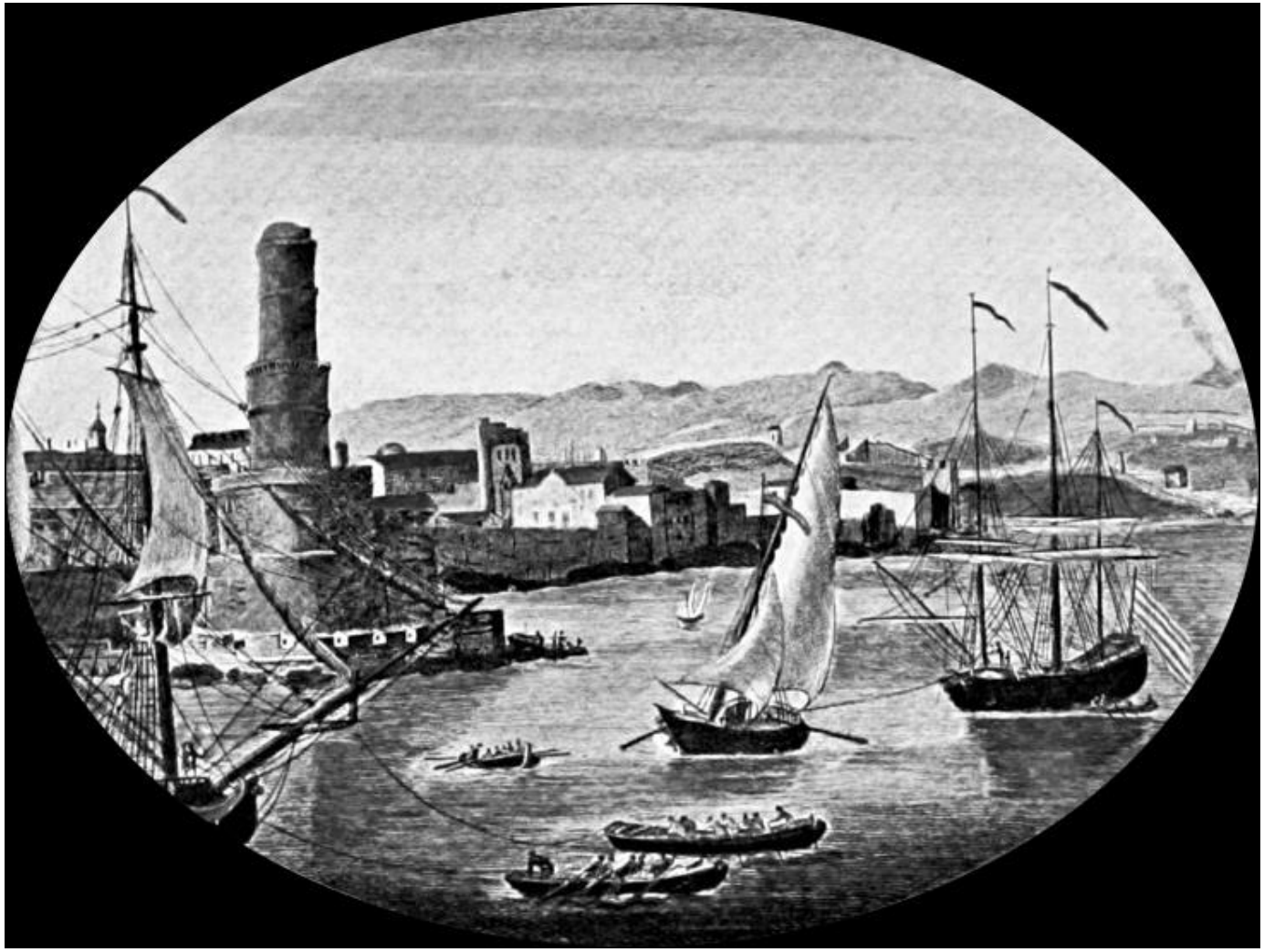
Upłynnienie gruntów (Soil Liquefaction)

Upłynnienie gruntów (Soil Liquefaction)

Upłynnienie gruntów (Soil Liquefaction)

AGH

Port Royal (June 7, 1692)



Upłynnienie gruntów (Soil Liquefaction)

Osiadanie zapadowe

Osiadaniem zapadowym nazywamy zdolność gruntu, znajdującego się pod określonym obciążeniem, do szybkiej zmiany objętości pod wpływem nasycenia wodą.

Cechę tę wykazują niektóre lessy. Czynniki warunkujące osiadanie zapadowe:

- **skład granulometryczny (przewagę frakcji pyłowej z małą ilością części koloidalnych),**
- **skład mineralny,**
- **wapnistość,**
- **zasolenie powyżej 0.3%,**
- **wilgotność naturalną niższą od granicy plastyczności,**
- **dobrze widoczną makroporowatość,**
- **porowatość powyżej 45%.**

Osiadanie zapadowe

Lessy o niewielkiej wilgotności naturalnej charakteryzują się niewielką ściśliwością oraz zazwyczaj zdolnością do osiadania zapadowego.

Lessy o wysokiej wilgotności naturalnej wykazują stosunkowo dużą ściśliwość i brak zdolności do osiadania zapadowego (E. Myślińska, 1984).

Najprostsze wyjaśnienie mechanizmu zjawiska osiadania zapadowego sprowadza się do uznania, że w wyniku zetknięcia się z wodą zostają przerwane wiązania istniejące między elementami szkieletu (pierwotnymi cząstkami i ziarnami oraz agregatami), a wobec dużej porowatości następuje załamanie się całej struktury szkieletowej lessów.

Osiadanie zapadowe

Według niektórych autorów (B. Grabowska-Olszewska, 1988) przyczyną załamania struktury „są tzw. mostki ilaste dające wiązania typu punktowo-koagulacyjnego między elementami strukturalnymi, które są uwarunkowane siłami o charakterze jonowo-elektrostatycznym".

Niewykluczone jest również, że istniejące mostki ilaste pod wpływem wody, powodującej zmniejszenie tarcia wewnętrznego ułatwiają przesuwanie się cząstek i zmianę trwałości struktury. Nie znaleziono jednak wyraźnej zależności między zawartością frakcji iłowej a osiadaniem zapadowym.

Występowanie lessów

Osiadanie zapadowe

Miarą intensywności zjawiska jest wskaźnik osiadania zapadowego i_{mp} (PN-88/B-04481) oznaczany w warunkach jednoosiowego (edometrycznego) odkształcenia i obliczany wg wzoru:

$$i_{mp} = \frac{h' - h}{h_0}$$

gdzie:

- h' – **wysokość próbki nienaruszonej w mm po stabilizacji odkształceń przy naprężeniu całkowitym σ_{zt}, odpowiadającym ciężarowi gruntu i budowli przed nasyceniem wodą,**
- h'' – **wysokość tej próbki w mm przy tym samym naprężeniu, ale po całkowitym nasyceniu wodą,**
- h_0 – **wysokość próbki w mm po stabilizacji odkształceń przy naprężeniu pierwotnym σ_z odpowiadającym ciężarowi gruntu na rozpatrywanej głębokości.**

Woda wolna

Woda wolna – gruntowa występuje w podziemnych nieckach i łożyskach wypełnionych żwirami i piaskami.

Zasilana jest przesiąkającą wodą deszczową, infiltracją wód powierzchniowych z otwartych zbiorników wodnych, rzek oraz kondensacją pary wodnej, znajdującej się w porach gruntów.

Zwierciadło wody podziemnej nazywane powszechnie zwierciadłem wody gruntowej jest to granica między strefą aeracji i saturacji w przestrzennym rozmieszczeniu wód pod powierzchnią terenu.

Woda wolna

Zwierciadło wód podziemnych może być napięte, lub swobodne.

Swobodne – pozostające pod ciśnieniem atmosferycznym, co oznacza że nad zwierciadłem wody w tej samej warstwie przepuszczalnej występuje przestrzeń bez wody umożliwiająca jego podnoszenie się.

Napięte – pozostające pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego. Jego położenie jest wymuszone przez wyżej leżące utwory nieprzepuszczalne, które uniemożliwiają wzrost poziomu zwierciadła wody. Występuje na granicy warstwy wodonośnej i nieprzepuszczalnej.

Woda wolna

Strefa aeracji, czyli napowietrzania, występuje między powierzchnią terenu a zwierciadłem wody podziemnej. W strefie aeracji pory gruntowe wypełnione są powietrzem, a woda występuje w różnych postaciach (np. jako higroskopijna, błonkowata, kapilarna).

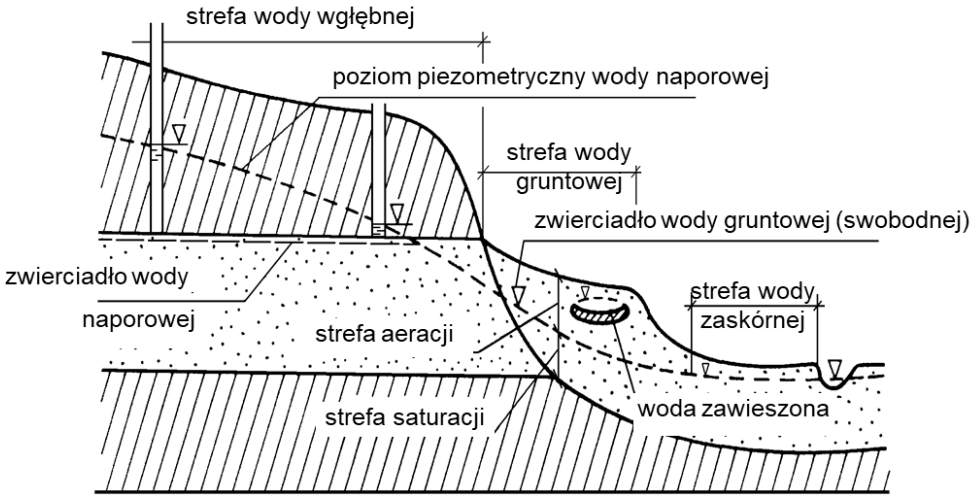
Strefa saturacji, czyli nasycenia wodą, występuje poniżej zwierciadła wody gruntowej. W strefie tej wolne przestrzenie między ziarnami mineralnymi otoczonymi wodą higroskopijną i błonkowatą wypełnia woda wolna.

Woda gruntowe

Rozróżniamy wody gruntowe właściwe i zaskórne.

Wody zaskórne występują przejściowo, blisko powierzchni terenu, na lokalnych soczewkach gruntów mało przepuszczalnych, leżących powyżej zwierciadła właściwej wody gruntowej.

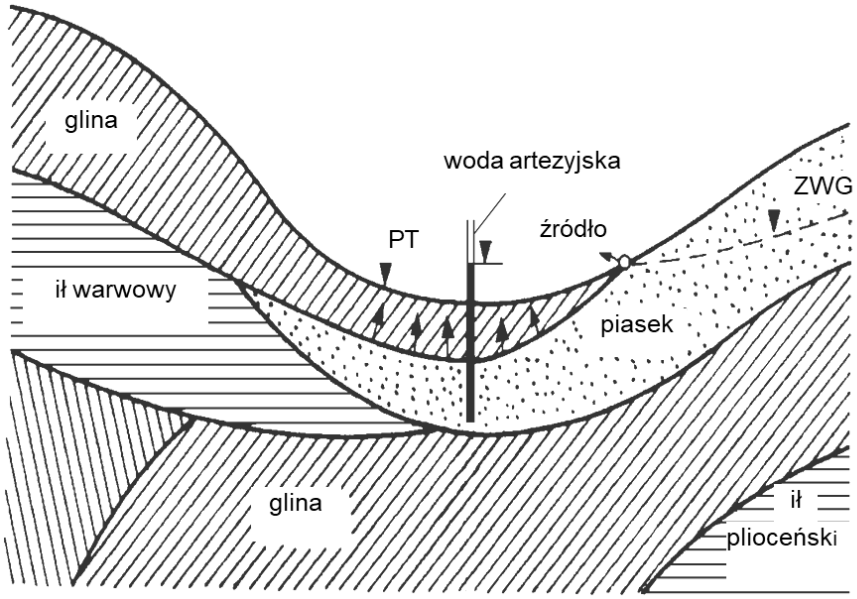
Wody gruntowe właściwe stanowią ciągły poziom wodonośny, występują na większej głębokości i zalegają na znacznym obszarze. Są oddzielone od powierzchni terenu strefą aeracji, nieraz znacznej miąższości.



Woda naporowa

Woda naporowa międzywarstwowa jest to woda gruntowa występująca między dwiema mało przepuszczalnymi warstwami. Wywiera ona ciśnienie zwane **ciśnieniem piezometrycznym** na spąg wyżej leżącej mało przepuszczalnej warstwy.

Woda artezyjska to taka, której zwierciadło wody naporowej znajduje się ponad powierzchnią terenu.



AGH

Woda naporowa

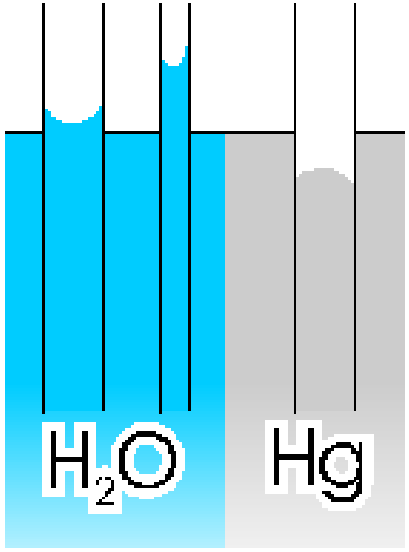
Wody kapilarne

Jednym z objawów działania sił molekularnych jest zjawisko włoskowatości, które polega na tym, że wąskich rurkach, tzw. kapilarach, zanurzonych w cieczy poziom jej podnosi się do pewnej wysokości lub opada. Jeżeli ciecz styka się z ciałem stałym, oprócz oddziaływania między cząsteczkami cieczy na cząsteczki cieczy działają również siły przyciągania (adhezji) ze strony cząsteczek ciała stałego. Na granicy ciała stałego i cząsteczek cieczy powstają więc siły wypadkowe różnie skierowane, zależnie od rodzaju cieczy i ciała stałego oraz wartości sił spójności i sił przylegania. W wyniku tych sił powierzchnia cieczy w miejscu zetknięcia się jej z ciałem stałym może mieć różny kształt.

Wody kapilarne

Wyróżnia się tu dwa przypadki:

1. **siły spójności w cieczy są mniejsze niż siły przylegania ciała stałego (woda i szkło); powstaje menisk wklęsły, ciecze zwilżające,**
2. **siły spójności w cieczy są większe niż siły przylegania; (rtęć i szkło); powstaje menisk wypukły, ciecze niezwilżające.**



Wody kapilarne

Cząsteczki cieczy znajdujące się w warstwie powierzchniowej tworzą rodzaj sprężystej i kurczliwej błonki znajdującej się w stanie napięcia, gdyż siły spójności starają się zmniejszyć powierzchnię – napięcie powierzchniowe cieczy. Ciśnienie wewnętrzne cieczy pod powierzchnią płaską jest wszędzie jednakowe. Jeżeli jednak powierzchnia cieczy jest zakrzywiona (np. menisk) występuje dodatkowe ciśnienie zwane włoskowatym, które jest tym większe, im mniejszy jest promień krzywizny. Jest ono dodatnie w przypadku powierzchni wypukłej, ujemne zaś w przypadku powierzchni wklęsłej. Właśnie w rurkach o małej średnicy, gdzie zakrzywienie powierzchni wody ma kształt bliski półkuli, wartość ciśnienia włoskowatego ma największe wartości, co powoduje wznoszenie się cieczy.

Wody kapilarne

Wznoszenie będzie trwało dopóty, dopóki ciężar słupa cieczy nie zrównoważy ciśnienia włoskowatego. W skałach i w gruntach, w których występują bardzo wąskie szczelinki lub kanaliki, woda podnosi się jak w naczyniach włoskowatych ponad swe zwierciadło swobodne. Wodę taką nazywamy kapilarną, a zjawisko kapilarnością.

Woda włoskowata – kapilarna przenosi ciśnienie hydrostatyczne, zamarza w temperaturze poniżej 0°C.

Wody kapilarne

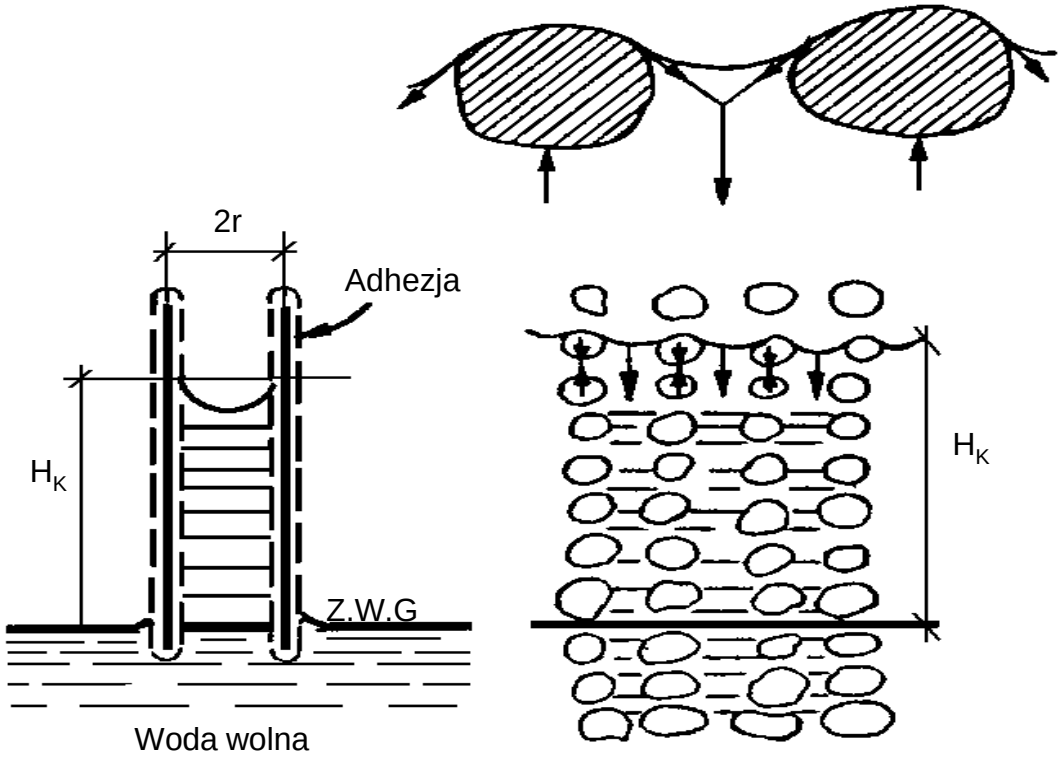
Wodę kapilarną dzieli się na trzy typy:

1. **Woda naroży porów tworzy się w miejscach styku cząstek w postaci oddzielnych kropli.**
2. **Woda zawieszona nie ma bezpośredniej łączności z poziomem wód gruntowych, stąd nie może być przez nie zasilana.**
3. **Właściwa woda kapilarna podnosi się w górę do poziomu wód gruntowych.**

Podciąganie kapilarne

Kapilarność jest wynikiem działania dwu zjawisk:

- **przyczepności (adhezji) wody do ścianek rurki**
- **napięcia powierzchniowego wody**



Podciąganie kapilarne

Wysokość kapilarnego podciągania H_k wody ponad swobodne jej zwierciadło można wyznaczyć z zależności pomiędzy ciężarem wody i siłami napięcia powierzchniowego.

Ciężar słupa wody w rurce wynosi:

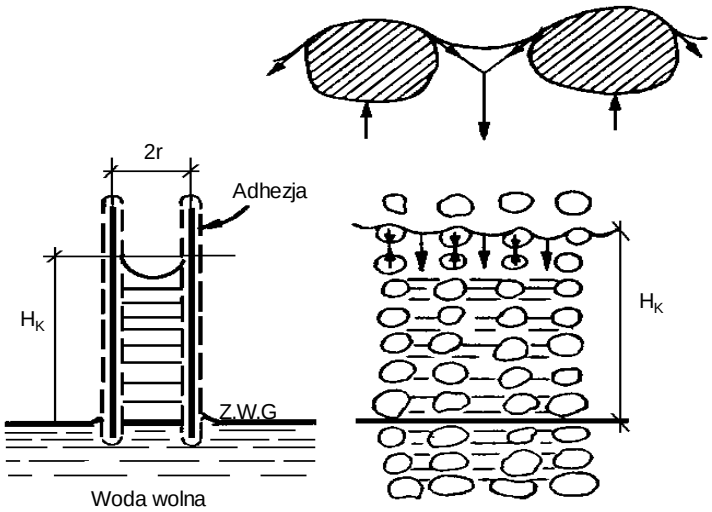
$$G = H_k \pi r^2 \gamma_w$$

gdzie:

H_k **– wysokość kapilarnego podciągania wody,**

r **– promień kapilary,**

γ_w **– ciężar objętościowy wody.**



Podciąganie kapilarne

Siła napięcia powierzchniowego przy kącie zwilżania $\alpha = 0$ (kąt styku menisku wody z powierzchnią ścianki kapilary szklanej, dla czystego szkła $\alpha = 0$) wynosi:

$$Q_p = 2\pi r \sigma_{np}$$

gdzie: σ_{np} **– napięcie powierzchniowe wody.**

Podciąganie kapilarne

Porównując prawe strony obu równań otrzymujemy:

$$H_k = \frac{2\sigma_{np}}{r\gamma_w}$$

Biorąc pod uwagę, że napięcie powierzchniowe wody w temperaturze $10°\mathrm{C}$ równa się $0.073\,\mathrm{N/m}$ oraz przyjmując ciężar objętościowy wody równy $9.81\,\mathrm{kN/m^3}$, otrzymuje się uproszczony wzór na wyznaczanie wysokości kapilarnego podciągania wody do góry w postaci:

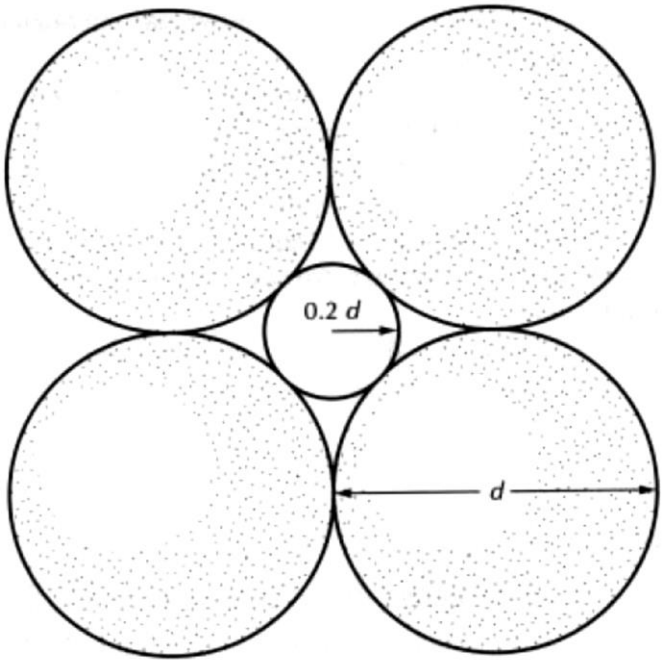
$$H_k = \frac{0.15}{r}$$

Zarówno H_k jak i r wyrażone są w centymetrach.

Średnica porów w gruntach

W gruntach drobnoziarnistych ekwiwalentny promień porów równy jest w przybliżeniu 0.2 średnicy ziarn. Do wstępnych obliczeń wysokości podnoszenia kapilarnego można więc przyjąć, że:

$$r = 0.2\,d$$



Wysokość podnoszenia kapilarnego w gruntach

Sediments	Grain Diameter (cm)	Pore Radius (cm)	Capillary Rise (cm)
Fine silt	0.0008	0.0002	750
Coarse silt	0.0025	0.0005	300
Very fine sand	0.0075	0.0015	100
Fine sand	0.0150	0.003	50
Medium sand	0.03	0.006	25
Coarse sand	0.05	0.010	15
Very coarse sand	0.20	0.040	4
Fine gravel	0.50	0.100	1.5

Podciąganie kapilarne

Podstawiając do tego wzoru $r = 0.01\,\mathrm{cm}$ otrzymuje się $H_k = 15\,\mathrm{cm}$. I tyle istotnie wynosi wysokość kapilarnego podciągania wody w piasku o uziarnieniu $0.2 \div 0.5\,\mathrm{mm}$. W przypadku gruntów ilastych średnice porów wynoszą $0.1\,\mu\mathrm{m}$ i mniej. Wysokość H_k obliczeniowo równałaby się więc $15000\,\mathrm{cm} = 150\,\mathrm{m}$. Wysokości obserwowane w naturze nie przekraczają jednak $3 \div 6\,\mathrm{m}$.

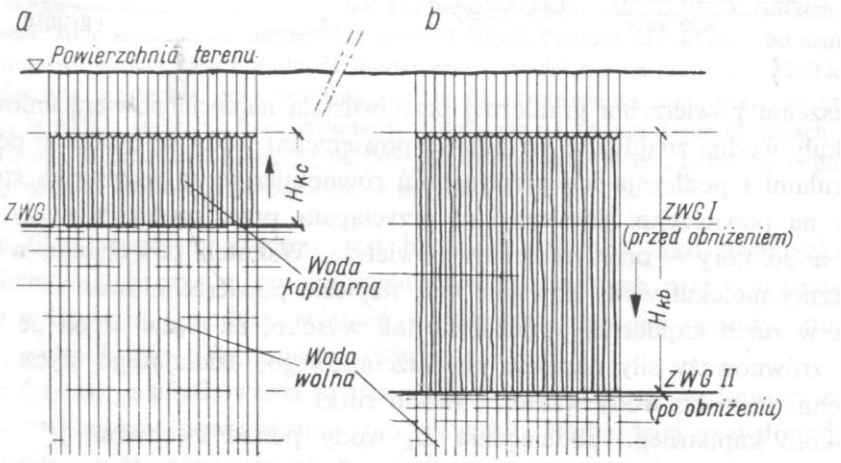
Należy to tłumaczyć tym, że w bardzo cienkich kapilarach cały przekrój rurki jest wypełniony wodą błonkową silnie przyciśniętą do ścianek kapilary, co przeciwdziała podciąganiu wody do góry.

Podciąganie kapilarne

Kapilarnością czynną nazywamy zjawisko podnoszenia się wody w kapilarze do góry w stosunku do zwierciadła wody wolnej.

Kapilarnością bierną nazywamy obniżenie się poziomu zwierciadła wody w stosunku do poziomu wody w kapilarach.

Kapilarną wysokością bierną H_{kb} nazywamy maksymalną możliwą do uzyskania różnicę poziomów menisków wody kapilarnej i zwierciadła wody.



Kapilarność
a – czynna, *b* – bierna ($H_{kc} < H_{kb}$); *ZWG* – zwierciadło wody gruntowej

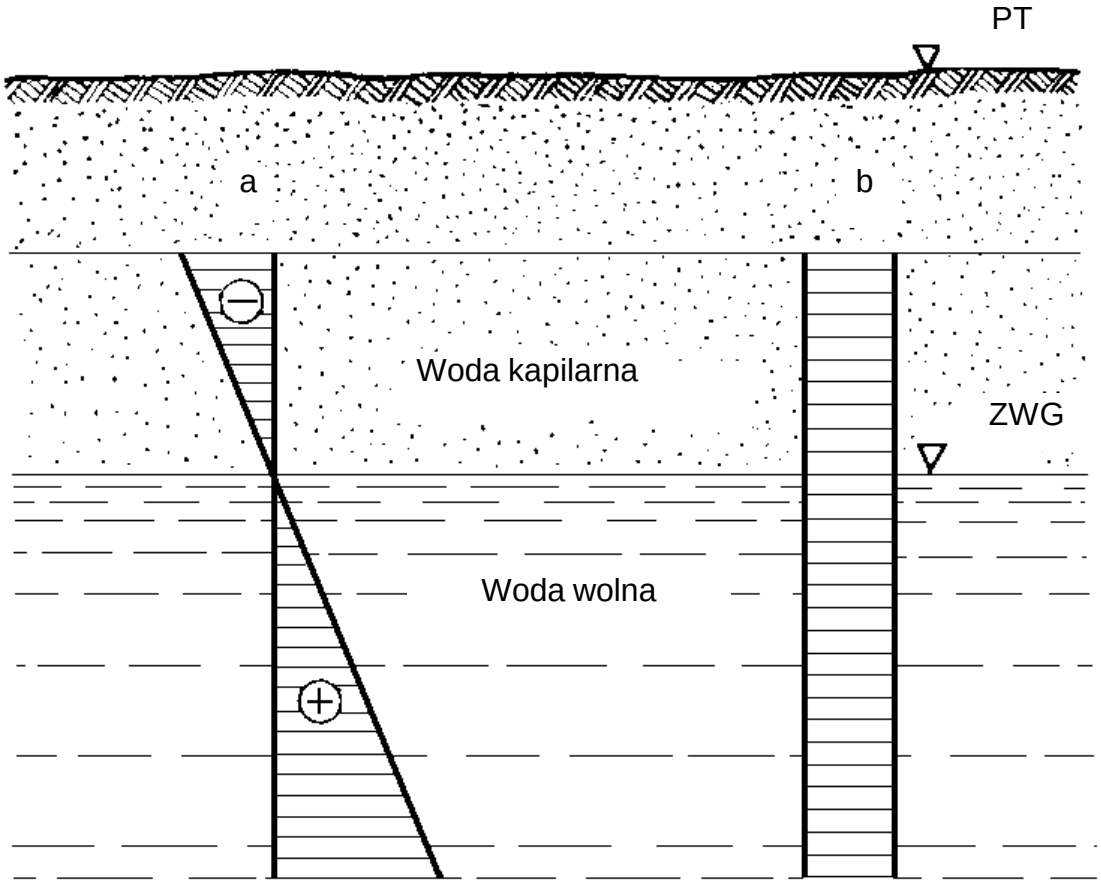
Podciąganie kapilarne

Rozkład ciśnień w wodzie kapilarnej i dodatkowych naprężeń kapilarnych w szkielecie gruntowym.

a) znak minus – ciśnienie w wodzie kapilarnej jest niższe niż atmosferyczne, znak plus – ciśnienie w wodzie wolnej jest wyższe niż atmosferyczne;

b) naprężenia w szkielecie gruntowym wskutek ciężaru zawieszonej wody kapilarnej;

PT – powierzchnia terenu, ZWG – zwierciadło wody gruntowej.



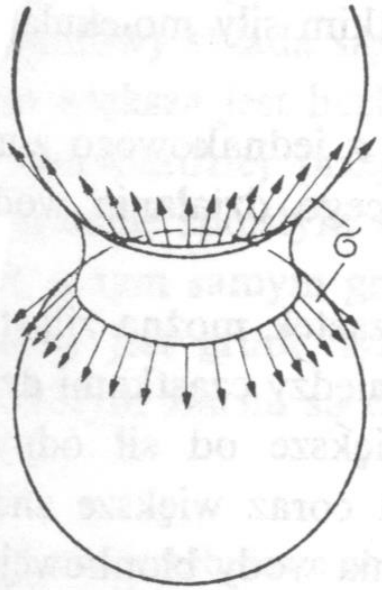
Podciąganie kapilarne

Zjawisko podnoszenia się wody lub jej utrzymywania się ponad swobodnym zwierciadłem wskazuje na to, że w wodzie kapilarnej występuje rozciąganie (podciśnienie), a w szkielecie gruntowym ściskanie. Naprężenia ściskające w szkielecie gruntowym można obliczyć wg wzoru:

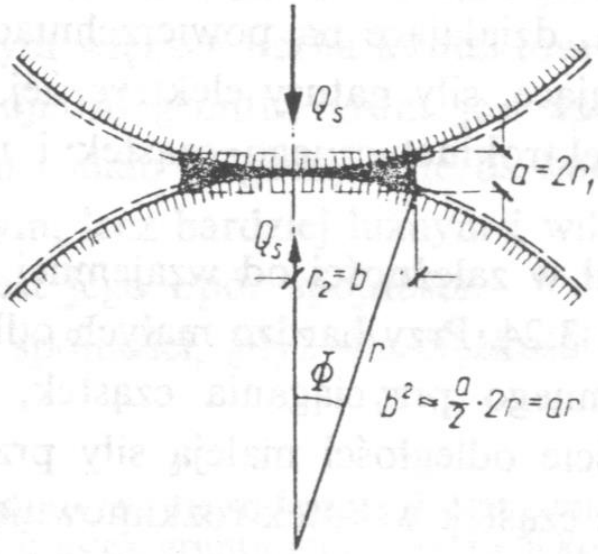
$$\sigma_{sk} = H_{wk}\gamma_w$$

Zaznaczyć należy, że naprężenia ściskające wywołane w szkielecie siłami kapilarności występują równomiernie nie tylko w strefie kapilarnego zawilgocenia gruntu, lecz i poniżej zwierciadła wody.

Kapilarność naroży porów



Dociskające działanie menisku wody w miejscu kontaktu dwu cząstek



3.23
Przekrój przez dwie kuliste cząstki i łączący je menisk

Kapilarność naroży porów

Kapilarność ma duże znaczenie w częściowo zawilgoconych gruntach, gdzie istnieją siły dociskające oddzielne cząstki poprzez meniski w punktach kontaktu. Siła ciśnienia powierzchniowego wody w menisku kontaktowym dociska cząstki do siebie. Wartość tej siły w przybliżeniu jest równa:

$$Q_s = 2\sigma_{np}\pi r$$

Wynika stąd, że siła docisku nie zależy od średnicy menisku i dla danej średnicy ziarna można ją uważać za stałą. Naprężenie ściskające w równoziarnistym szkielecie gruntowym można obliczyć ze wzoru:

$$\sigma_{sk} \approx \frac{Q_s}{2r^2} = \frac{\sigma_{np}\pi}{2r}$$

Kapilarność naroży porów

Przyjmując $r = 0.1\,\mathrm{mm}$ (jak dla piasku średniego) lub $r = 0.1\,\mu\mathrm{m}$ (jak dla iłu) odpowiednio otrzymujemy:

$$\sigma_{sk} \approx 1.2\,\mathrm{kPa}$$

$$\sigma_{sk} \approx 1.2\,\mathrm{MPa}$$

Widać wyraźnie, że im mniejszy jest promień cząstek, tym większy jest ich wzajemny docisk do siebie.

Kapilarność naroży porów

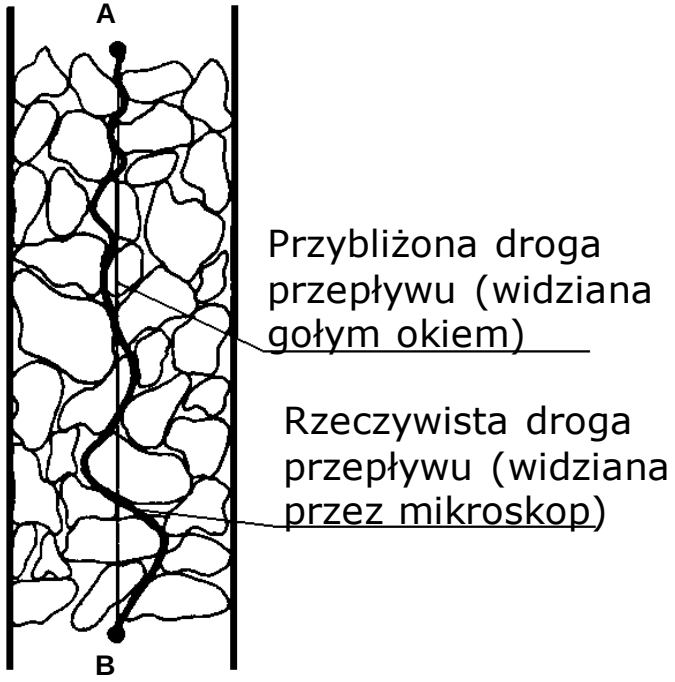
Przepływ wody w gruncie

- **Istota przepływu cieczy w gruncie**
- **Filtracja**
- **Prawo Darcy'ego**
- **Ograniczenia prawa Darcy'ego**
- **Podstawowe równanie przepływu w gruncie**
- **Siatka filtracyjna**

Istota przepływu cieczy w gruncie

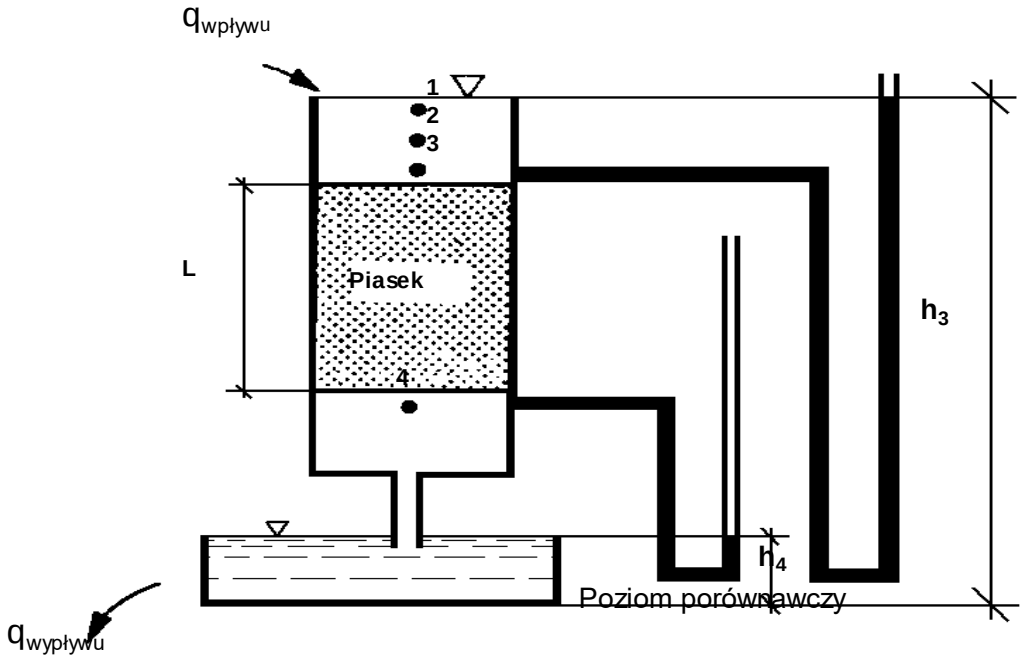
Pory w gruncie są połączone, więc przepływ wody możliwy jest nawet w najbardziej zagęszczonych gruntach naturalnych.

W próbce gruntu woda może przepływać z punktu A do punktu B, jednakże nie po linii prostej i ze stałą prędkością, lecz od poru do poru po krzywej.



Droga przepływu wody w gruncie

Prawo Darcy'ego, filtracja



$$q = k\frac{h_3 - h_4}{L}A$$

$$i = \frac{h_3 - h_4}{L}$$

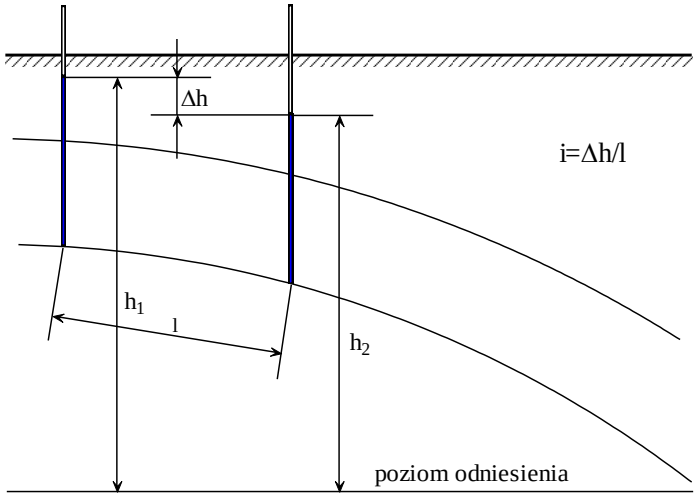
$$q = kiA$$

- q – wydatek przepływu,
- k – stała, współczynnik proporcjonalności, zwany współczynnikiem filtracji,
- h_3 – wysokość ponad poziomem porównawczym, do której nastąpiło podniesienie wody w piezometrze umieszczonym powyżej próbki,
- h_4 – wysokość jak h_3 lecz w piezometrze poniżej próbki,
- L – długość próbki,
- A – pole całkowite poprzecznego przekroju.

Prawo Darcy'ego, filtracja

$$\frac{q}{A} = ki = v$$

Stosując zasadę ciągłości można powiązać prędkość dopływu v ze średnią rzeczywistą prędkością przepływu przez grunt v_s



$$q = vA = v_s A_p$$

$$v_s = v\frac{A}{A_p} = v\frac{AL}{A_p L} = v\frac{V}{V_p} = \frac{v}{n}$$

Prędkość filtracji to średnia rzeczywista prędkość przepływu w gruncie v_s – jest ona równa prędkości dopływu podzielonej przez porowatość:

$$v_s = \frac{v}{n} = \frac{ki}{n}$$

Prawo Darcy'ego, filtracja

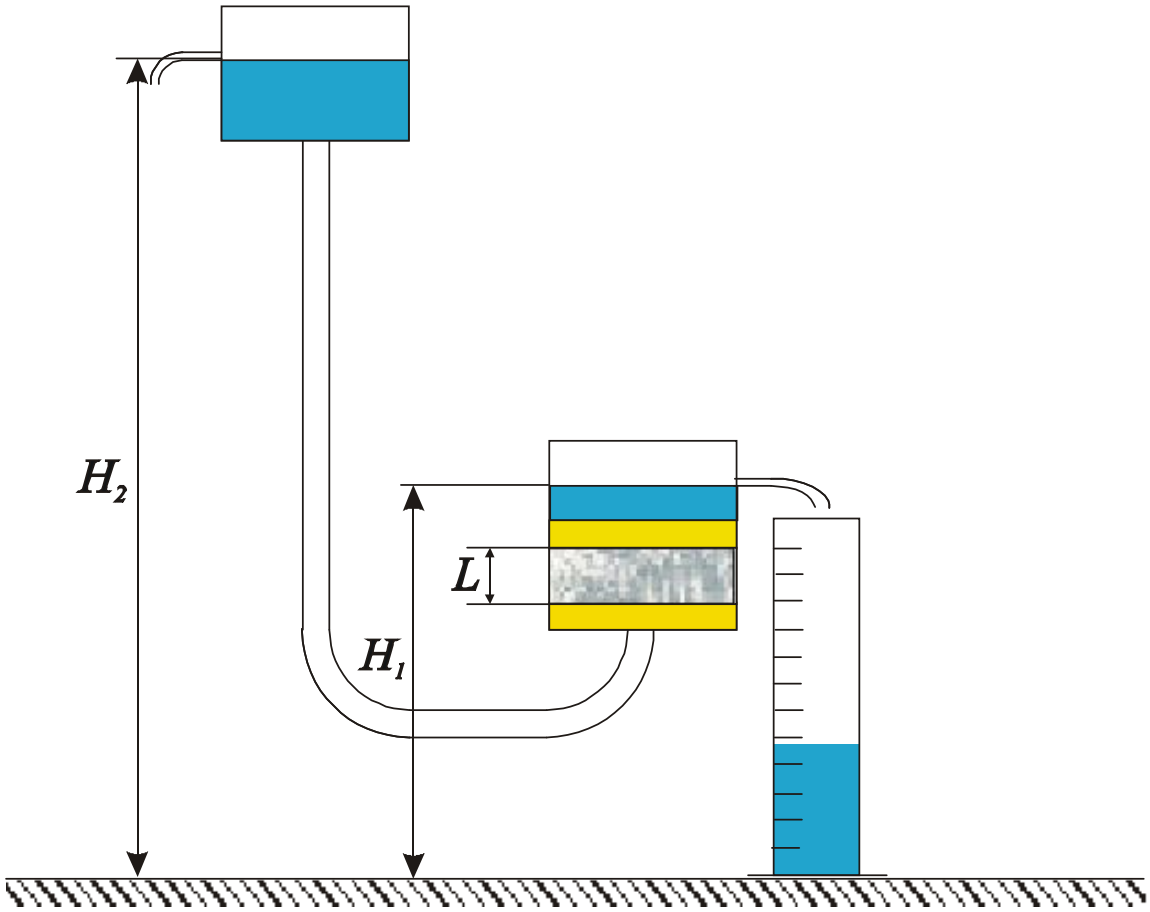
Filtracja to ruch wody gruntowej, zależy od:

- **ośrodka gruntowego w którym przepływ się odbywa,**
- **uziarnienia ośrodka gruntowego (im drobniejsze jest uziarnienie gruntu tym większe są opory ruchu wody),**
- **struktury i porowatości.**

Orientacyjne wartości współczynnika filtracji

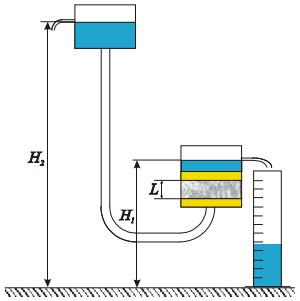
Nazwa gruntu	Współczynnik filtracji, k, m/s
Drobny żwir	10^{-2}-10^{-3}
Piasek gruboziarnisty	10^{-3}-10^{-4}
Piasek dronoziarnisty	10^{-4}-10^{-5}
Piasek pylasty	10^{-5}-10^{-6}
Less o strukturze nienaruszonej	10^{-5}-10^{-6}
Less o strukturze przerobionej	10^{-7}-10^{-9}
Pył	10^{-6}-10^{-8}
Gliny	10^{-8}-10^{-10}
Gliny zwięzłe	10^{-9}-10^{-11}
Iły	10^{-10}-10^{-12}

Metody określania współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności)



Schemat aparatu do określania współczynnika filtracji o stałym spadku hydraulicznym

Metody określania współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności)



Współczynnik filtracji określa się na podstawie wzoru na wydatek przepływu, zgodnie z którym objętość wody przepływająca przez próbkę o polu przekroju A w czasie t wynosi:

$$Q = q \cdot t = k \cdot i \cdot A \cdot t$$

Uwzględniając, że spadek hydrauliczny jest stały i wynosi:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_2 - H_1}{L}$$

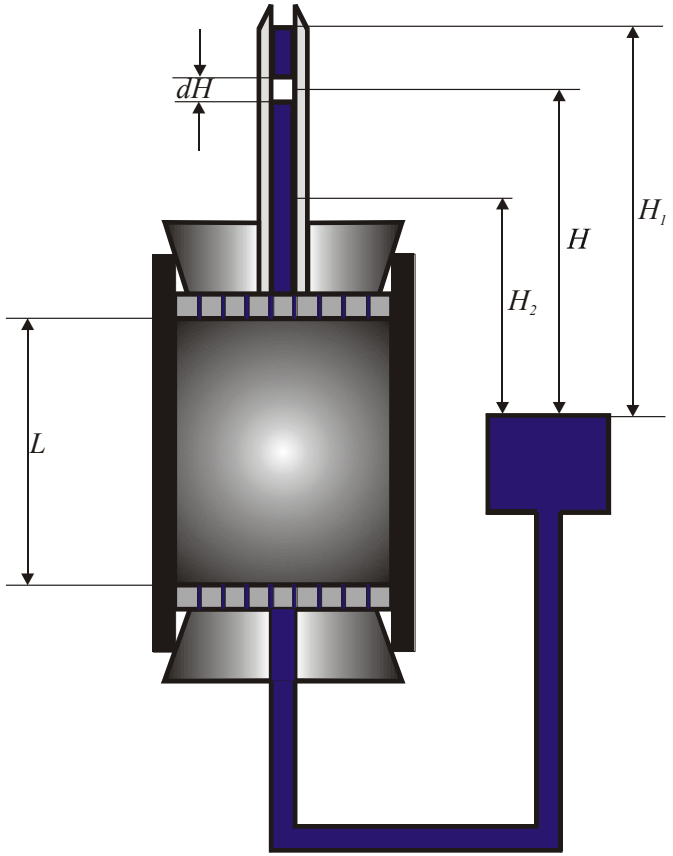
współczynnik filtracji obliczyć można ze wzoru:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A(H_2 - H_1)t}$$

gdzie: L – długość próbki, H_1 – wysokość wody w naczyniu dolnym, H_2 – wysokość wody w naczyniu górnym.

Określenie współczynnika filtracji polega więc na pomiarze objętości wody przepływającej przez próbkę o określonych wymiarach w danym czasie.

Metody określania współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności)

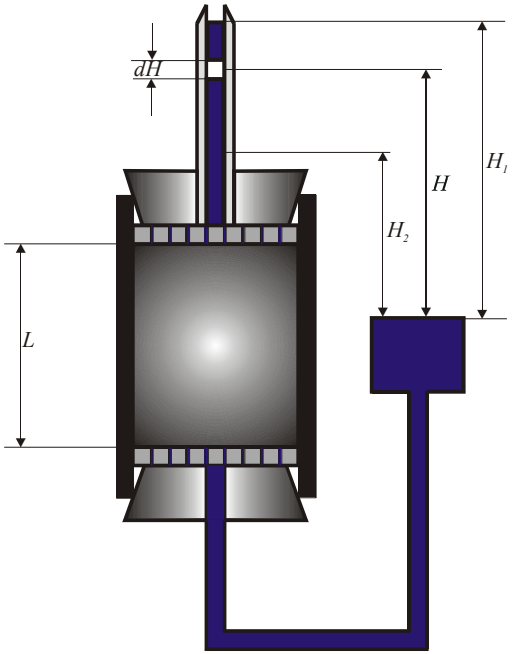


Schemat aparatu do określania współczynnika filtracji o zmiennym spadku hydraulicznym

Metody określania współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności)

Zgodnie z prawem Darcy ilość wody przepływającej przez rurkę o przekroju a w czasie Δt określić można ze wzoru:

$$-a \cdot v \cdot \Delta t = -a \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} \Delta t = k \cdot i \cdot A \cdot \Delta t$$



Uwzględniając, że spadek hydrauliczny w chwili t wynosi:

$$i = \frac{H}{L}$$

otrzymuje się równanie różniczkowe w postaci:

$$-a \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} = k \frac{H}{L} A$$

Metody określania współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności)

Rozdzielając zmienne otrzymuje się równanie w postaci:

$$\mathrm{d}t = \frac{a \cdot L}{A \cdot k}\left(-\frac{\mathrm{d}H}{H}\right)$$

a po scałkowaniu, i uwzględnieniu, że w chwili $t = 0$, $H = H_1$, a w chwili $t = t_1$, $H = H_2$, otrzymuje się ostateczny wzór na określenie współczynnika filtracji:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t_1} \ln \frac{H_1}{H_2}$$

lub:

$$k = 2.303 \frac{a \cdot L}{A \cdot t_1} \log \frac{H_1}{H_2}$$

Badanie przy zmiennym spadku hydraulicznym może być stosowane do określania współczynnika filtracji **słabo przepuszczalnych gruntów drobnoziarnistych**.

Określanie współczynnika filtracji za pomocą wzorów empirycznych

Wzór Hazena:

$$k_{10} = C \cdot d_{10}^2 \ [\mathrm{m/d}]$$

gdzie:

k_{10} **– współczynnik filtracji przy temperaturze wody 10°C,**

d_{10} **– średnica efektywna, mm**

C **– empiryczny współczynnik zależny od nierównomierności uziarnienia:**

C = 1200 gdy 1 < C_U < 2

C = 800 gdy 2 < C_U < 4

C = 400 gdy 4 < C_U < 5

Uwaga: Wzór Hazena stosuje się, jeśli spełnione są warunki: $0.1 < d_{10} < 3.0$ **i** C_U **< 5**

Określanie współczynnika filtracji za pomocą wzorów empirycznych

Wzór Seeldheima:

$$k = 0.357 \cdot d_{50}^{2} \ [\mathrm{cm}/s]$$

gdzie:

d_{50} – **średnica zastępcza odpowiadająca zawartości 50% ziarn na krzywej uziarnienia [mm]**

Wzór USBSC „amerykański”:

$$k = 0.36 \cdot d_{20}^{2.3} \ [\mathrm{cm}/s]$$

gdzie:

d_{20} – **średnica zastępcza odpowiadająca zawartości 20% ziarn na krzywej uziarnienia [mm]**

Określanie współczynnika filtracji za pomocą wzorów empirycznych

Dla gruntów gliniasto-piaszczystych, w których zawartość cząstek o średnicy $d \leq 0.001\,\mathrm{mm}$ wynosi od 2 do 20% współczynnik filtracji w m/s określać można z wzoru Hazena zmodyfikowanego przez Tkaczuka (Pisarczyk, 1998) w postaci:

$$k = \frac{0.0093}{a^2} d_{10}^2$$

w którym:

a – zawartość cząstek o średnicy $d \leq 0.001\,\mathrm{mm}$,

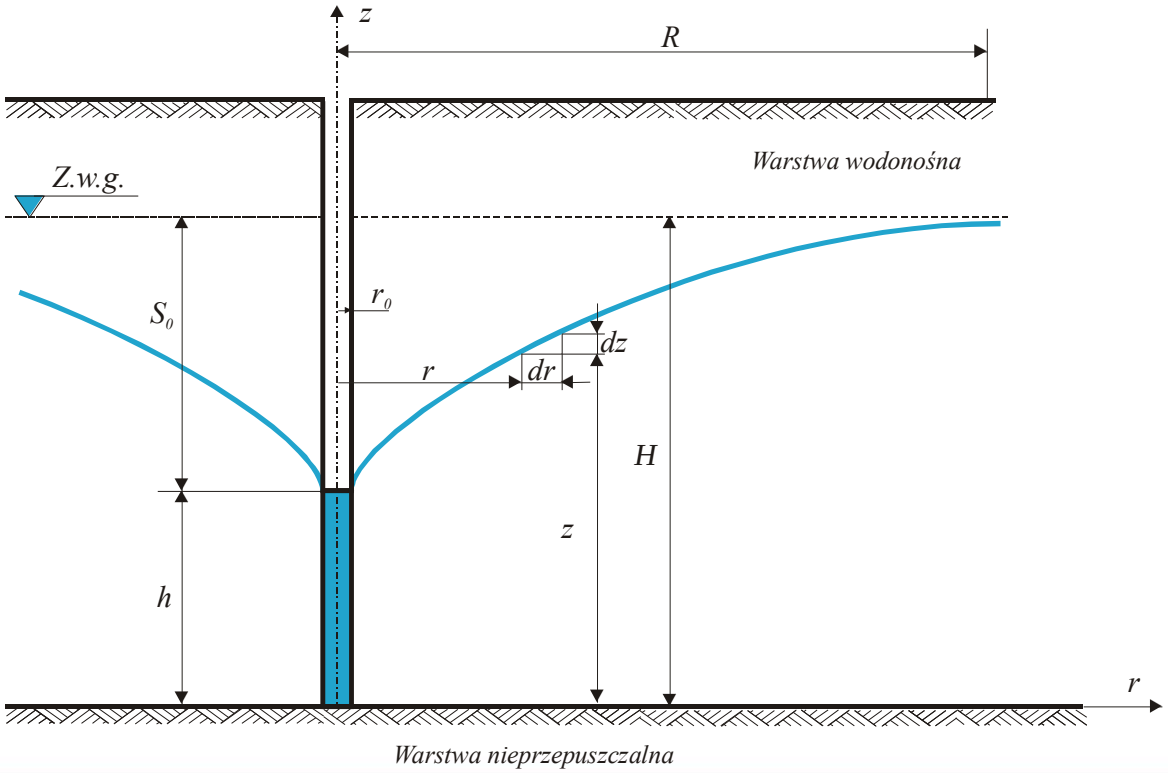
d_{20} – średnica miarodajna [mm].

Polowe metody określanie współczynnika filtracji

Trudności odtworzenia w warunkach laboratoryjnych rzeczywistych warunków przepływu wody przez ośrodek gruntowy powodują, że określone w ten sposób wartości współczynnika filtracji obarczone mogą być znacznym błędem. Dlatego też do określenia rzeczywistych wartości współczynników filtracji stosuje się metody polowe.

Metoda próbnego pompowania

W przypadku górotworu zbudowanego z gruntów sypkich, jednorodnych i izotropowych, spoczywającego na utworach nieprzepuszczalnych, wokół studni opartej na stropie gruntów nieprzepuszczalnych wytwarza się symetryczny lej depresji.



Metoda próbnego pompowania

Powierzchnię przepływu w zasięgu leja depresji określić można ze wzoru:

$$A = 2\pi \cdot r \cdot z$$

Uwzględniając, że spadek hydrauliczny w punkcie na krzywej depresji odległym o r od studni wynosi:

$$i = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}r}$$

wydajność studni, określona na podstawie prawa Darcy, wyraża wzór:

$$q = A \cdot v = A \cdot k \cdot i = 2\pi \cdot r \cdot z \cdot k \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}r}$$

Rozdzielając zmienne uzyskuje się równanie w postaci:

$$\frac{\mathrm{d}r}{r} = \frac{2\pi \cdot k}{q} z\mathrm{d}z$$

Metoda próbnego pompowania

Całkując powyższe równanie dla warunków początkowych dla $r = r_0$, $z = h$ a dla $r = R$, $z = H$, czyli:

$$\int_{r_0}^{R} \frac{\mathrm{d}r}{r} = \frac{2\pi k}{q} \int_{h}^{H} z\mathrm{d}z$$

po uporządkowaniu otrzymujemy wzór na określenie współczynnika filtracji w postaci:

$$k = \frac{q}{\pi(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r_0}$$

gdzie:

q **– wydajność studni,**

H **– grubość warstwy wodonośnej,**

S_0 **– obniżenie zwierciadła wody przy ściance studni, R – zasięg leja depresji, ro – promień studni.**

Zmiany w gruncie wywołane filtracją

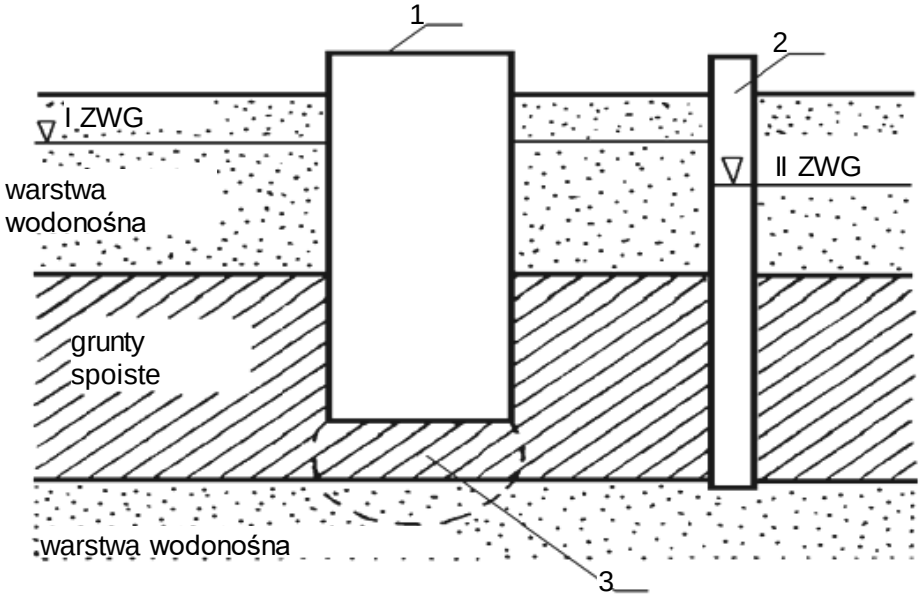
- **Kurzawka**
- **Wyparcie gruntu**
- **Przebicie hydrauliczne**
- **Sufozja**
- **Kolmatacja**

Kurzawka

Kurzawka najczęściej występuje w piaskach drobnych. W gruntach o grubym uziarnieniu, np. w żwirach, zjawisko to występuje niezmiernie rzadko. Jest to spowodowane niewielkimi gradientami $i << 1$, jakie na ogół występują w gruntach o dużej przepuszczalności (gruboziarnistych).

Wyparcie gruntu

Wyparciem gruntu nazywa się zjawisko polegające na przesunięciu pewnej objętości gruntu (często wraz z obciążającymi ją elementami ubezpieczeń). Wyparta masa powiększa swoją objętość i porowatość. Zjawisko wyparcia może występować nie tylko w kierunku pionowym do góry, lecz również poziomo w podłożu budowli piętrzących wodę, a niekiedy również w kierunku do dołu.

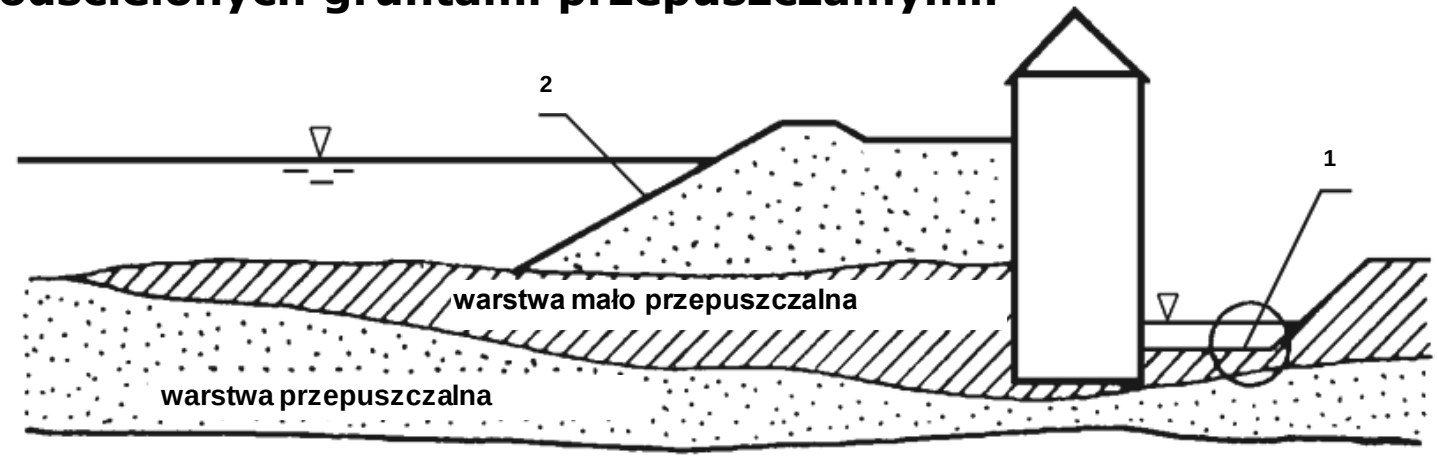


Przykład warunków gruntowo-wodnych, w których może nastąpić przebicie:

1. **studnia opuszczona,**
2. **piezometr,**
3. **strefa zagrożenia wyparciem.**

Przebicie hydrauliczne

Przebiciem hydraulicznym nazywa się zjawisko tworzenia się kanału (przewodu) w masie gruntowej, wypełnionego gruntem o naruszonej strukturze (w końcowej fazie zjawiska – zawiesiną), łączącego miejsca o wyższym i niższym ciśnieniu wody w porach. Na powierzchni terenu przebicie hydrauliczne jest widoczne w postaci źródła. Zjawisko przebicia występuje przeważnie w gruntach mało spoistych podścielonych gruntami przepuszczalnymi.



Przykład warunków geologicznych, w których może nastąpić przebicie: 1 – miejsce zagrożenia przebiciem.

Sufozja

Sufozja to zjawisko polegające na wynoszeniu przez filtrującą wodę drobnych cząstek gruntu (przesunięcie ich na inne miejsce lub wyniesione poza obręb gruntu). W rezultacie sufozji powiększają się pory, wzrasta współczynnik filtracji i prędkość wody. Woda o większej prędkości może poruszać coraz większe ziarna gruntu i powodować dalszy rozwój procesu sufozji aż do utworzenia się kawern lub kanałów w gruncie. Zjawisko przybiera wtedy cechy przebicia hydraulicznego.

Sufozja występuje wtedy, gdy zostanie przekroczony i_{kr} lub prędkość krytyczna v_{kr}.

$$v_{kr} = \frac{\sqrt{k}}{15}$$

gdzie: k – współczynnik filtracji $[\mathrm{m/s}]$.

Sufozja

Sufozja występuje w gruntach sypkich (przede wszystkim różnoziarnistych). W zależności od miejsca występowania sufozji w zaporze rozróżnia się sufozję:

- **wewnętrzną (występuje wewnątrz danego rodzaju gruntu)**
- **zewnętrzną i kontaktową (w strefie przypowierzchniowej zapory lub podłoża a także na styku różnych warstw gruntu, gdy kierunek ruchu wody jest prostopadły do styku).**

Sufozja mechaniczna

Sufozja chemiczna

Zasady zabezpieczania gruntu przed szkodliwym działaniem filtracji

Środki, którymi zabezpiecza się grunty przed szkodliwym działaniem filtracji można podzielić na trzy grupy.

1. **Sposoby zabezpieczeń zmniejszających spadek hydrauliczny (wydłużenie drogi filtracji – np. ścianki szczelne, przesłony etc.),**
2. **Konstrukcje gruntowe zwane filtrami odwrotnymi,**
3. **Odwodnienie.**

Zasady zabezpieczania gruntu przed szkodliwym działaniem filtracji

Do pierwszej zalicza się sposoby zabezpieczeń zmniejszających spadek hydrauliczny (wydłużenie drogi filtracji), a tym samym ciśnienie spływowe, a więc spełniające warunek:

$$i \leq \frac{i_{kr}}{F} \quad \textbf{lub} \quad F \geq \frac{\gamma'}{j}$$

gdzie:

i – spadek hydrauliczny w dowolnym miejscu podłoża lub budowli ziemnej,

F – współczynnik pewności (F = 1.5÷2 ÷5).

Zasady zabezpieczania gruntu przed szkodliwym działaniem filtracji

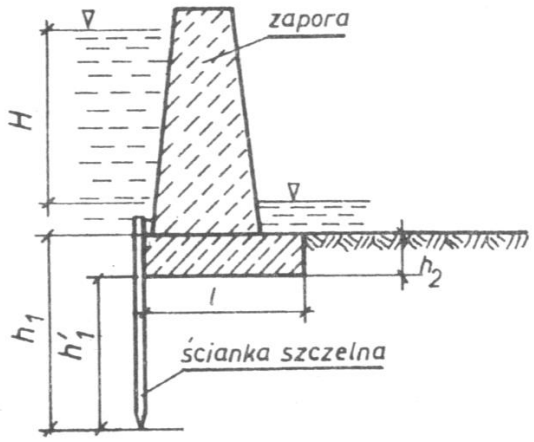
Obliczenie niezbędnej drogi filtracji można dokonać w sposób przybliżony korzystając ze wzoru podanego przez Bligha:

$$L \geq C_w H$$

gdzie:

L **– długość drogi filtracji (na rysunku),** $L = h_1 + h'_1 + l + h_2$

C_w **– wskaźnik filtracji (podany w tabeli).**



Zasady zabezpieczania gruntu przed szkodliwym działaniem filtracji

Wskaźnik filtracji C_w

Rodzaj gruntu	C_w wg Bligha	C_w wg Lane'a
Pył	18,0	8,5
Piasek drobny	15,0	7,0
Piasek średni	–	6,0
Piasek gruby	12,0	5,0
Żwir z piaskiem	9,0	–
Żwir drobny	–	4,0
Żwir średni	–	3,5
Żwir gruby	–	3,0
Otoczaki i żwir	4-6	2,5

Zasady zabezpieczania gruntu przed szkodliwym działaniem filtracji

Według wzoru Lane'a

$$\frac{1}{3}l + \sum h \geq C_w H$$

gdzie:

l **– poziome odcinki drogi filtracji,**

$\sum h$ **– pionowe odcinki drogi filtracji**

C_w **– wskaźnik filtracji (podany w tabeli).**

Filtr odwrotny

Działanie filtrów odwrotnych polega na następującej zasadzie: jeśli woda przepływa kolejno przez np. trzy warstwy gruntu o coraz większym współczynniku filtracji, to przy założeniu ciągłości przepływu można napisać zależność:

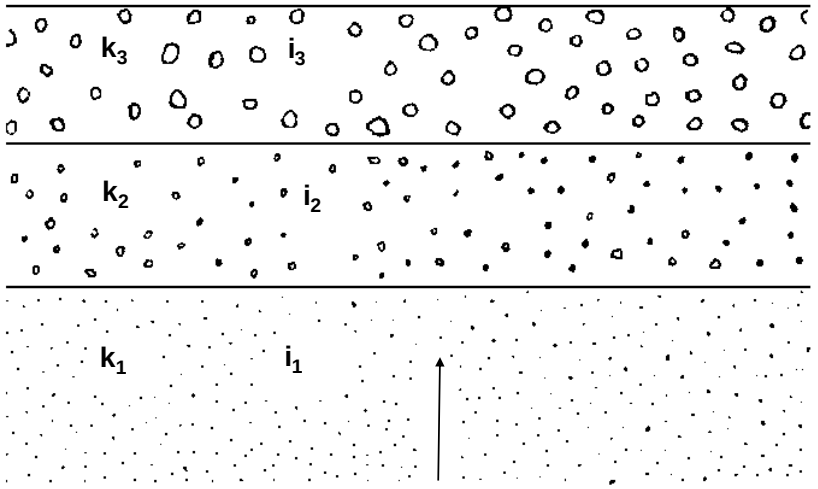
$$v = k_1 i_1 = k_2 v_2 = k_3 v_3$$

gdzie:

v **– prędkość** $[\mathrm{m/s}]$**,**

k_1, k_2, k_3 **– współczynnik filtracji w poszczególnych warstwach** $[\mathrm{m/s}]$**,**

i_1, i_2, i_3 **– spadki hydrauliczne w poszczególnych warstwach**



Schemat filtru odwrotnego

Filtr odwrotny

Ponieważ $k_1 < k_2 < k_3$ uwzględniając równanie będzie $i_1 > i_2 > i_3$. Z otrzymanej zależności wynika, że jeśli na warstwie pierwszej gruntu drobniejszego, zagrożonego działaniem filtracji, ułożona zostanie warstwa druga gruntu grubszego, to będzie w niej mniejszy spadek hydrauliczny, a zatem mniejsze ciśnienie spływowe. Na skutek obciążenia warstwami wyżej leżącymi poprawią się warunki warstwy dolnej.

Podczas ruchu wody możliwe jest wypłukiwanie ziaren drobnych, co prowadzi do „zamulenia filtrów" i utraty ich funkcji (kolmatacja). Aby temu zapobiec wymiary ziaren materiału filtracyjnego muszą spełniać określone kryteria. W praktyce najczęściej stosuje się następujące kryteria doboru uziarnienia materiału filtra.

Filtr odwrotny

Podczas ruchu wody możliwe jest wypłukiwanie ziarn drobnych, co prowadzi do „zamulenia filtrów” i utraty ich funkcji. Aby temu zapobiec wymiary ziarn materiału filtracyjnego muszą spełniać określone kryteria. W praktyce najczęściej stosuje się następujące kryteria doboru uziarnienia materiału filtra:

Kryterium Terzaghi i Peck’a (1967):

$$\frac{d_{15(F)}}{d_{85(P)}} < 5 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} > 4$$

Kryterium U.S. Department of Navy (1971):

$$\frac{d_{50(F)}}{d_{50(P)}} < 25 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} < 20$$

Metody odwodnienia

1. **Za pomocą drenażu pionowego:**
   - **studnie depresyjne,**
   - **igłofiltry.**

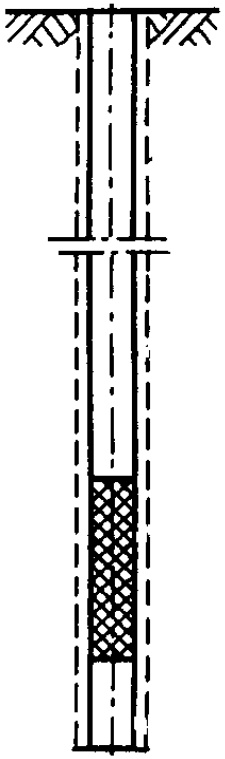
Sposób ten stosuje się zwykle w celu czasowego obniżenia zwierciadła wód gruntowych.

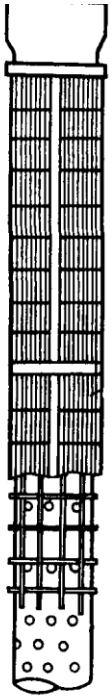
2. **Za pomocą drenażu poziomego:**
   - **sączki ceramiczne,**
   - **sączki betonowe.**

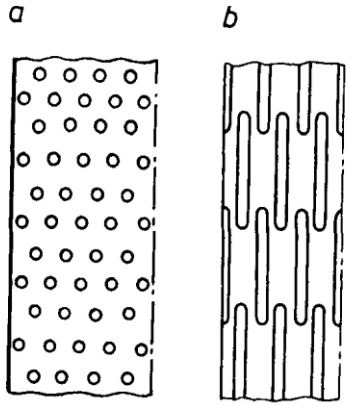
Sączki powinny być otoczone materiałem filtracyjnym o odpowiednim uziarnieniu dla uniknięcia ich zamulenia.

Konstrukcja i wykonanie studni wierconych

Konstrukcja studni zależy m.in. od rodzaju instalowanej w niej pompy. Studnie z pompami głębinowymi składają się z trzech części: rury nadfiltrowej, filtru i rury podfiltrowej.







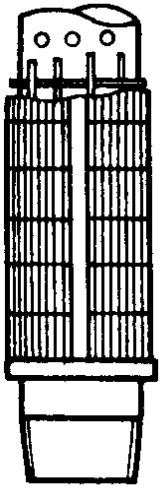
Rysunek: Otwory przelotowe w filtrach z rur wiertniczych:

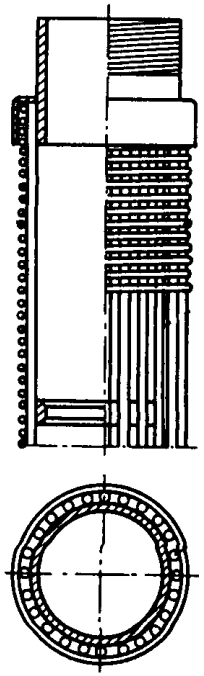
a – okrągłe; b – szczelinowe

Rodzaje filtrów

Rodzaje filtrów:

- **siatkowe – wykonane na szkielecie z rur wiertniczych z nawierconymi otworami okrągłymi;**
- **prętowe – o dużym współczynniku przepuszczalności**





Rodzaje filtrów

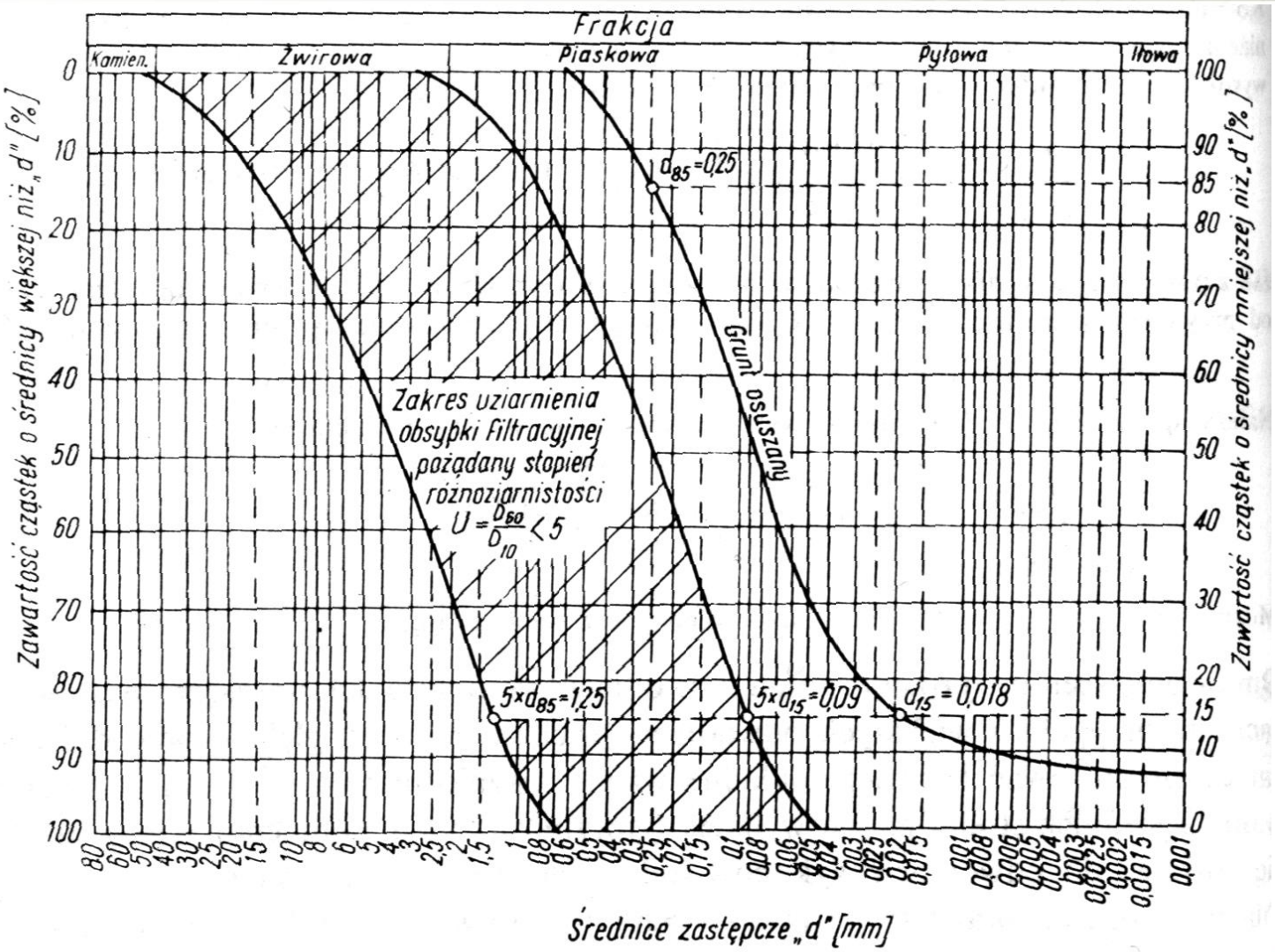
Szerokość oczek filtra:

$$b_s \approx d_{50(P)}$$

Średnica obsypki filtracyjnej

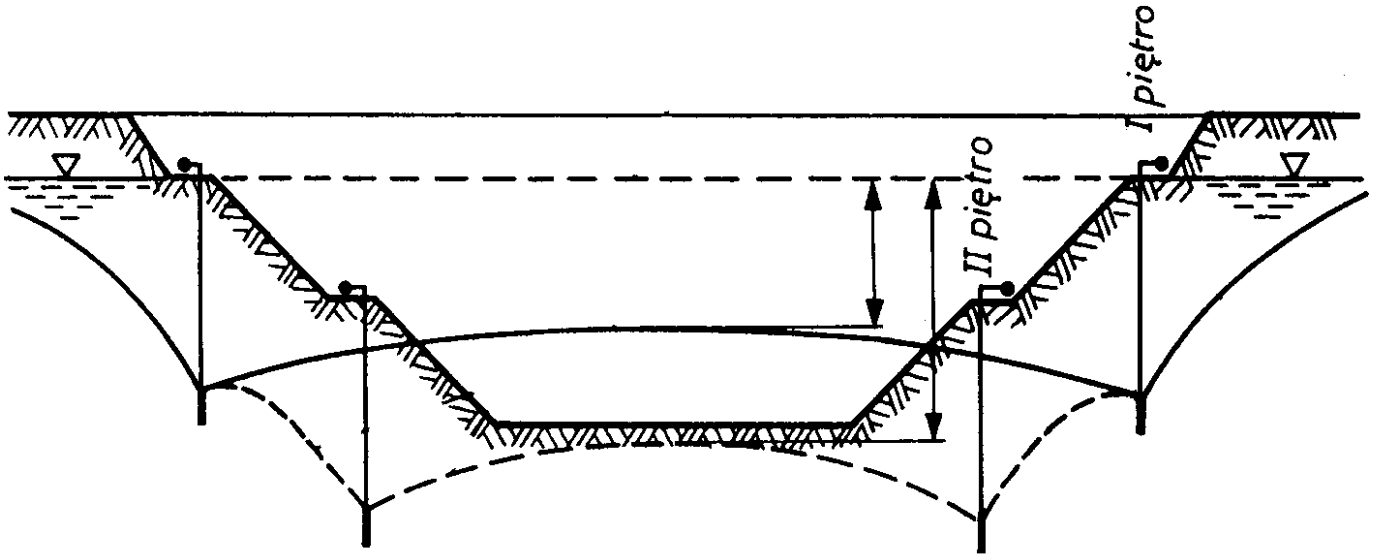
$$5d_{85(P)} > d_{15(F)} > 5d_{15(P)}$$

Dobór uziarnienia obsypki filtracyjnej



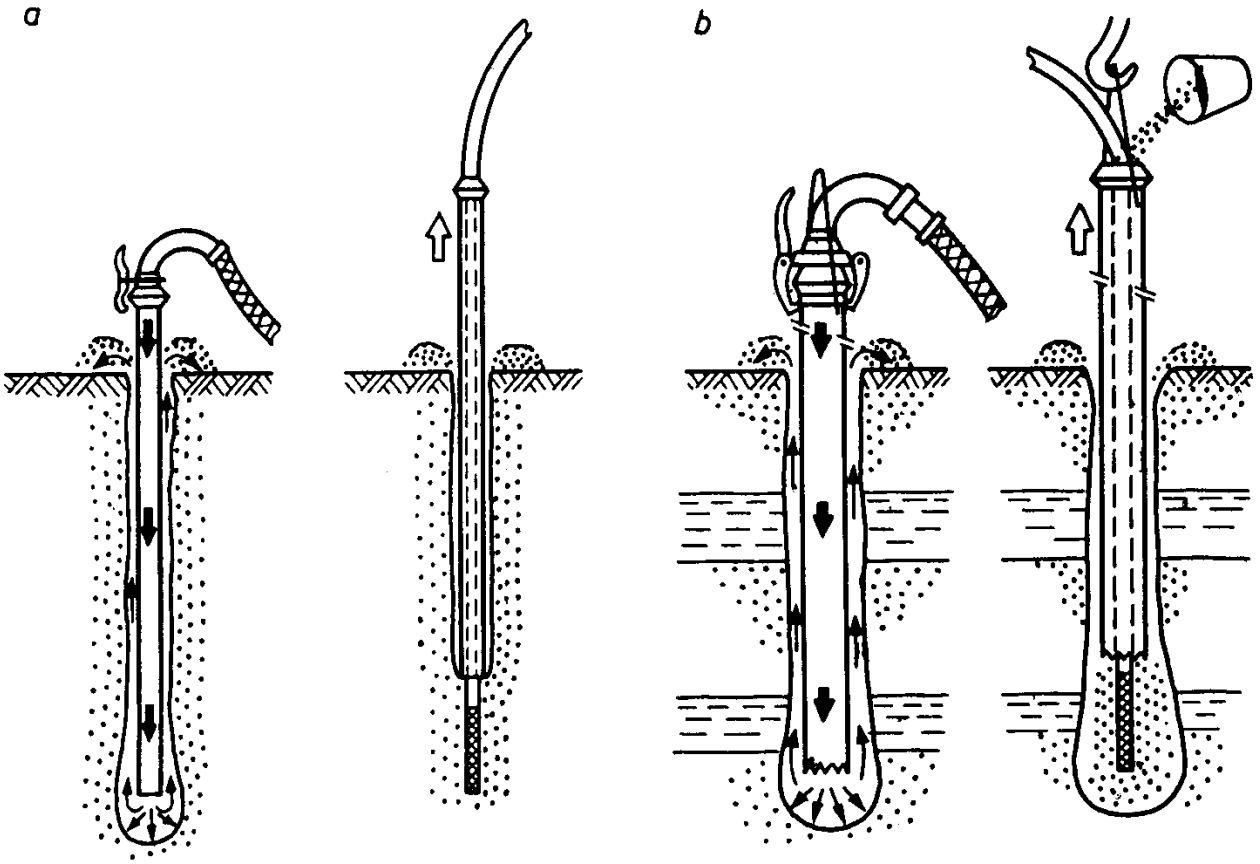
Odwodnienia igłofiltrami

Schemat instalacji igłofiltrowej jedno- i dwupiętrowej



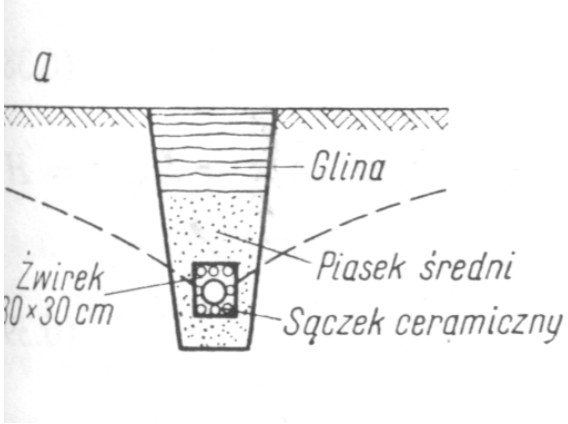
Odwodnienia igłofiltrami

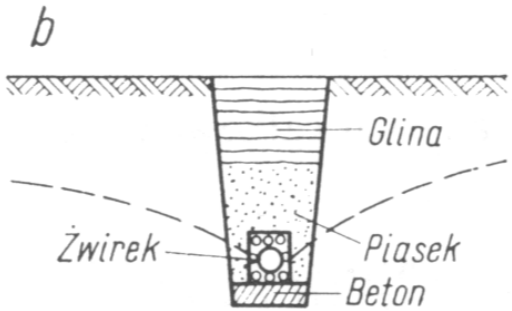
Schemat wpłukiwania igłofiltrów



Drenaże

Przekroje drenaży





Przekroje drenaży

a — z filtrem odwrotnym dookoła sączka, *b* — z filtrem ułożonym na warstwie betonu

Filtr odwrotny

Podczas ruchu wody możliwe jest wypłukiwanie ziarn drobnych, co prowadzi do „zamulenia filtrów” i utraty ich funkcji. Aby temu zapobiec wymiary ziarn materiału filtracyjnego muszą spełniać określone kryteria. W praktyce najczęściej stosuje się następujące kryteria doboru uziarnienia materiału filtra:

Kryterium Terzaghi i Peck’a (1967):

$$\frac{d_{15(F)}}{d_{85(P)}} < 5 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} > 4$$

Kryterium U.S. Department of Navy (1971):

$$\frac{d_{50(F)}}{d_{50(P)}} < 25 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} < 20$$

Filtr odwrotny

Podczas ruchu wody możliwe jest wypłukiwanie ziarn drobnych, co prowadzi do „zamulenia filtrów” i utraty ich funkcji. Aby temu zapobiec wymiary ziarn materiału filtracyjnego muszą spełniać określone kryteria. W praktyce najczęściej stosuje się następujące kryteria doboru uziarnienia materiału filtra:

Kryterium Terzaghi i Peck’a (1967):

$$\frac{d_{15(F)}}{d_{85(P)}} < 5 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} > 4$$

Kryterium U.S. Department of Navy (1971):

$$\frac{d_{50(F)}}{d_{50(P)}} < 25 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} < 20$$

Filtr odwrotny

Podczas ruchu wody możliwe jest wypłukiwanie ziarn drobnych, co prowadzi do „zamulenia filtrów” i utraty ich funkcji. Aby temu zapobiec wymiary ziarn materiału filtracyjnego muszą spełniać określone kryteria. W praktyce najczęściej stosuje się następujące kryteria doboru uziarnienia materiału filtra:

Kryterium Terzaghi i Peck’a (1967):

$$\frac{d_{15(F)}}{d_{85(P)}} < 5 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} > 4$$

Kryterium U.S. Department of Navy (1971):

$$\frac{d_{50(F)}}{d_{50(P)}} < 25 \qquad \frac{d_{15(F)}}{d_{15(P)}} < 20$$

Przepływ wody w gruncie

Literatura

- Szymański A. – Wykłady z mechaniki gruntów i budownictwa ziemnego
- Wiłun Z. – Zarys geotechniki
- Lambe T. W. Whitman R.V (1976, 1977) Mechanika gruntów,Tom I i II, Arkady, Warszawa
- Verruijt A. 2001. Soil Mechanics
- Coduto D.P. 1999. Geotechnical Engineering.
- Coduto D.P. 2001. Foundation design.
- Jarominiak A. 1999. Lekkie konstrukcje oporowe.
- Myślińska E. 2001. Laboratoryjne badania gruntów.
- Obrycki M., Pisarczyk S. 1999. Zbiór zadań z mechaniki gruntów.