

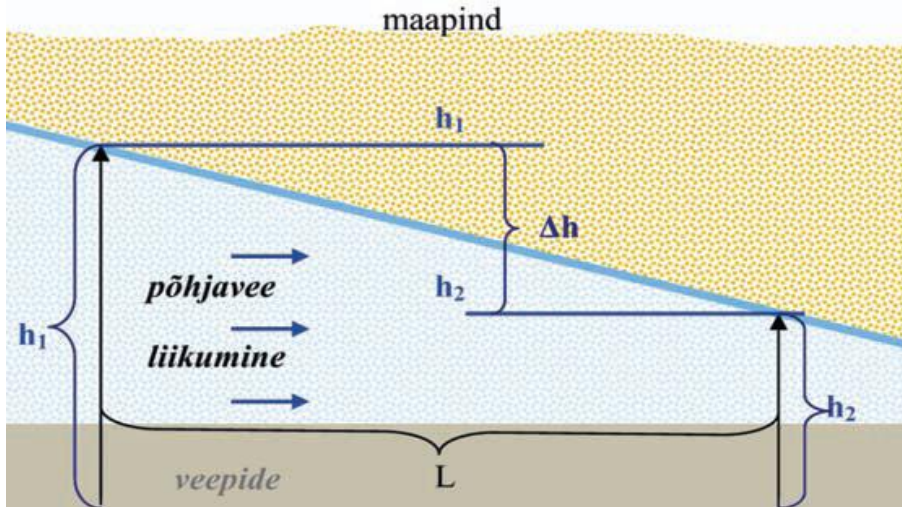
Voolamise põhimõtted

(Principles of Flow)

“Groundwater Science”

1. Darcy seadus ja filtratsiooni moodul

Põhjavee kogus (Q), mis läbib ajaühikus kivimit, on võrdeline rõhu langusega (Δh) ning veevoolu ristlõike pindalaga (A) ja pöördvõrdeline vee liikumise tee pikkusega (L).



Vabapinnalise põhjavee liikumine

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L}$$

Q – vooluhulk, [m^3/d]

K – filtratsiooni moodul, [m/d]

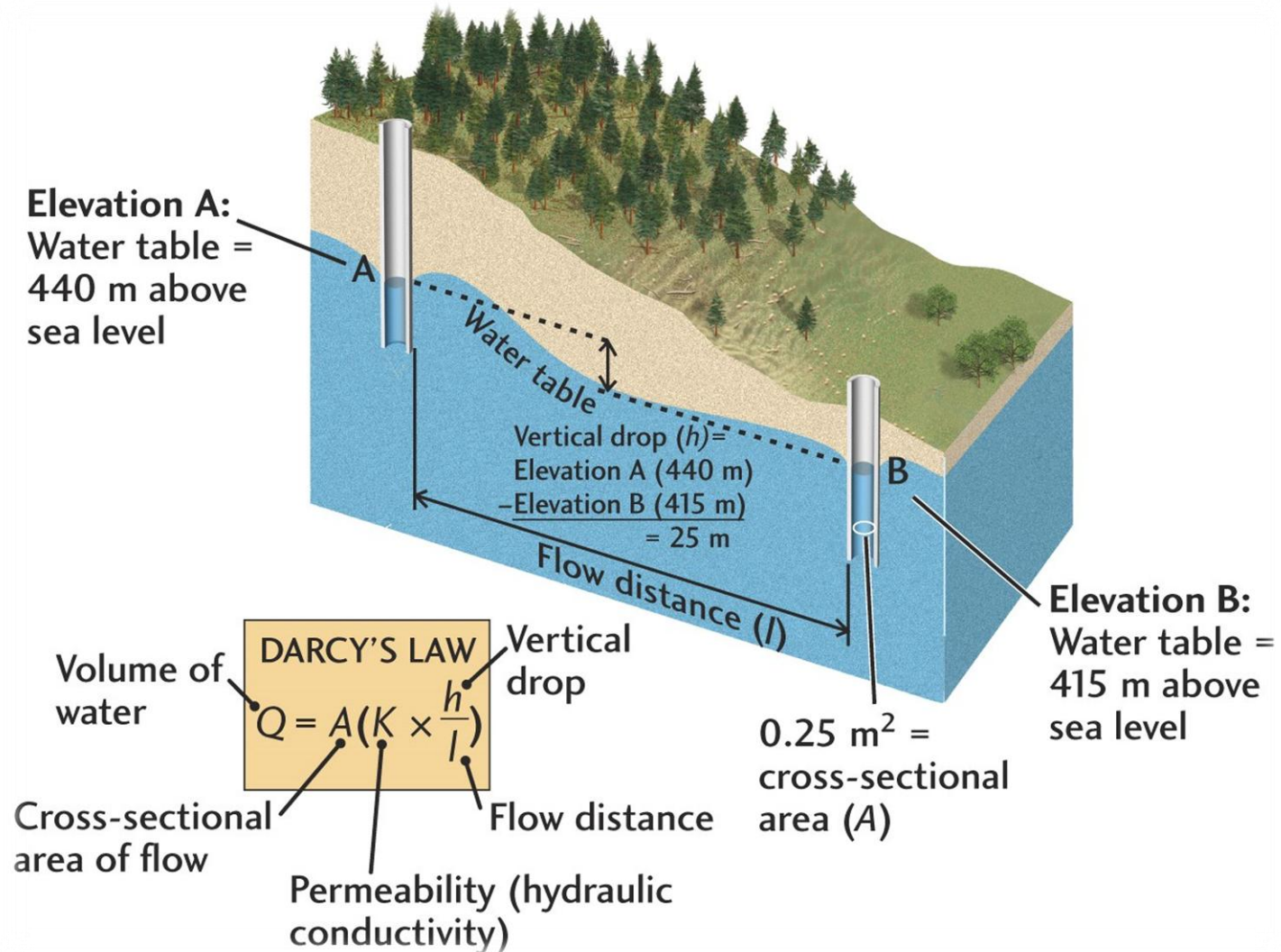
A – ristlõike pindala, [m^2]

$\Delta h = h_2 - h_1$ – rõhkude vahe

L – vee liikumise tee pikkus, [m]

$\Delta h/L$ – hüdrauliline gradient
(tähistatakse tavaliselt I)

Darcy seadus



Filtratsioonimoodulid

Kivim	K [m/d]
Jäme kruus, klibu	100...1000
Liivasegune kruus, jäme liiv	10...100
Liiva- ja savisegune kruus, kesk- ja peeneteraline liiv	1...10
Peenliiv, saviliiv	0,1...1
Liivsavi	0,001...0,1
Savi, tihe mergel jt.	<0,001

Lubjakivi, dolomiit lasevad vett läbi aeglaselt ja suure surve all. Neid nimetatakse suhteliselt vettpidavateks.

Filtratsioon

Põhjavete liikumist veega küllastunud kihi poorides või tühimikes nimetatakse *filtratsiooniks*.

Pinnase filtratsiooni omadused sõltuvad peamiselt pinnaseterade kujust, mõõtmetest ja pinnase enda koostisest.

Pinnasepooride mahu suhet pinnase mahtu nimetatakse **poorsuseks**

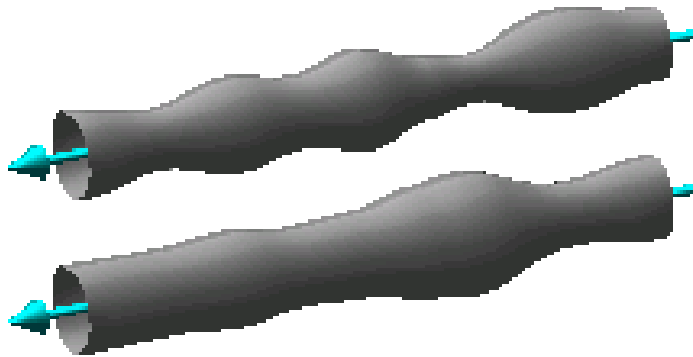
Filtratsiooni kiirus

Darcy seadust võib väljendada ka **vooluhulga** ja **pinnase ristlõike pindala** suhtena järgmise valemi abil:

$$u_f = \frac{Q}{A}$$

u_f - filtratsiooni kiirus, [m/d]
 Q – vooluhulk, [m³/d]
 A – ristlõike pindala, [m²]

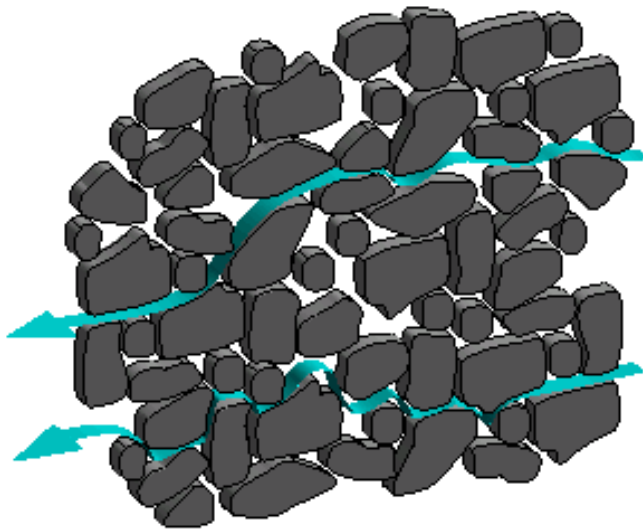
Filtratsiooni kiirus on **tegelikust** pinnasevee liikumise kiirusest väiksem.



Laminaarne voolamine Darcy
seaduse järgi

$$u_f = \frac{Q}{A}$$

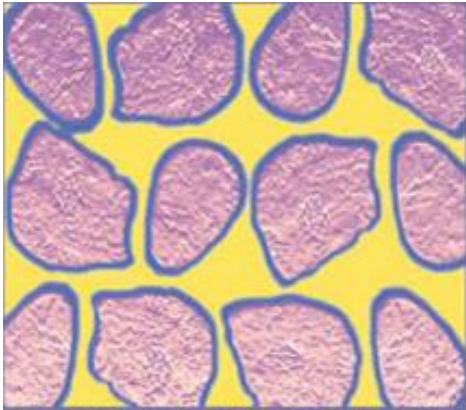
u_f - filtratsiooni kiirus, [m/d]
 Q – vooluhulk, [m³/d]
 A – ristlõike pindala, [m²]



Tegelik pinnasevee liikumise teekond

$$v = \frac{u_f}{n_e}$$

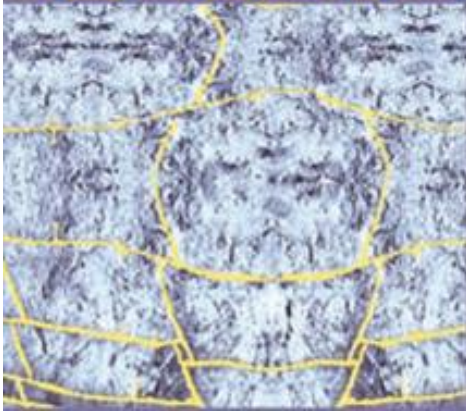
v – keskmine laminaarne voolamise
kiirus, [m/d]
 u_f - filtratsiooni kiirus, [m/d]
 n_e – efektiivpoorsus [suhtarv]



Liivapinnas

Filtratsioonimoodul: $K = 5 \text{ [m/d]}$

Efektiivne poorsus: $n_e = 15\%$



Lubjakivi

Filtratsioonimoodul: $K = 5 \text{ [m/d]}$

Efektiivne poorsus: $n_e = 1,5\%$

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L} \quad u_f = \frac{Q}{A} \quad v = \frac{u_f}{n_e}$$

Vee liikumiskiirus on lubjakivis 10 korda kiirem kui liivas. Samades tingimustes levib reoaine lubjakivis kiiremini ja kaugemale kui liivas.

Põhjavee tegeliku liikumise kiirust on vaja teada reostuse liikumise kiiruse hindamiseks.

Ligikaudne vee **tegelik liikumiskiirus** erinevates pinnastes on:

Pinnase tüüp	v
tolmliiv	5 m/aastas;
peenliiv	20 m/aastas;
keskliiv	70 m/aastas;
kruusliiv	250 m/aastas;
puhas kruus	5 m/päevas;
karstunud lubjakivi	üle 100 m/päevas

Kivimi sisemine läbilaskvus (Intrinsic Permeability)

$$k = \frac{K\mu}{\rho_w g}$$

k – kivimi sisemine läbilaskvus, [cm^2]

(Kivimi läbilaskvus on empiiriline parameeter, ühikuks on darsi, $=1 \mu\text{m}^2$, on suurem suuremate pooride korral)

K – filtratsiooni moodul, [m/d], [cm/sek]

μ – viskoossus, [kg/m*sek] [Pa/sek]

ρ_w – vee tihedus, [g/cm^3]

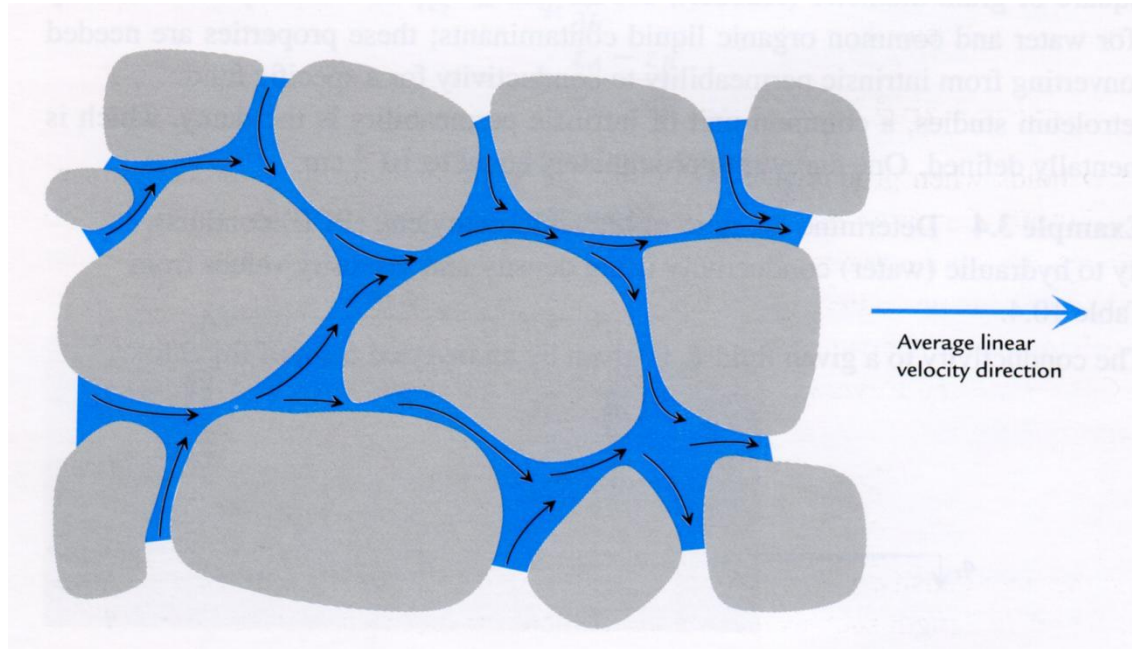
g – raskuskiirendus, [cm/sek^2]

K ja k on proportsionaalsed ning nende suhe on antud valemis.

Homogeenses pinnases, kus pinnaseterade suurus ja kuju on sarnased, kivimi läbilaskvuse väärtus on võrdne tera diameetri ruuduga.

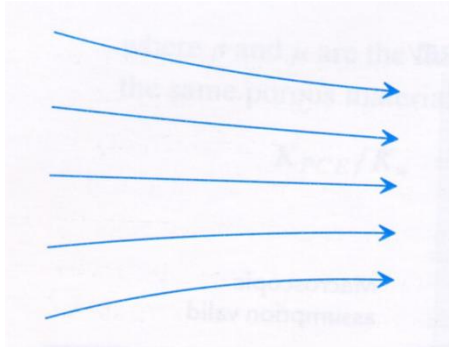
Darcy seaduse piirangud

1. Voolamise ühtluse eeldus

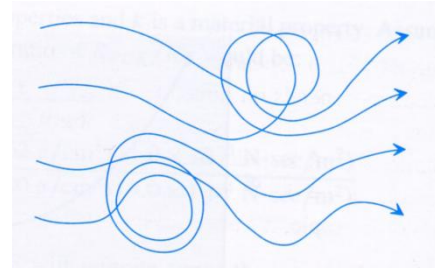


Darcy seadus eeldab olukorda, kus voolamine toimub ühtlase suuna ning kiirusega. Tegelikkuses ei ole vee liikumise voolujooned pinnasepoorides paralleelsed ning voolukiirus on varieeruv.

2. Laminaarse voolamise eeldus



Laminaarne voolamine



Turbulentne voolamine

Laminaarne voolamine on regulaarne, kihiline voolamine mis kehtib väikestel kiirustel.

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu}$$

R_e – Reynoldsi arv, [dimensioonita]

ρ – vee tihedus, [kg/m³]

v – keskmine voolamise kiirus, [m/sek]

d – keskmine pooride diameeter, [m]

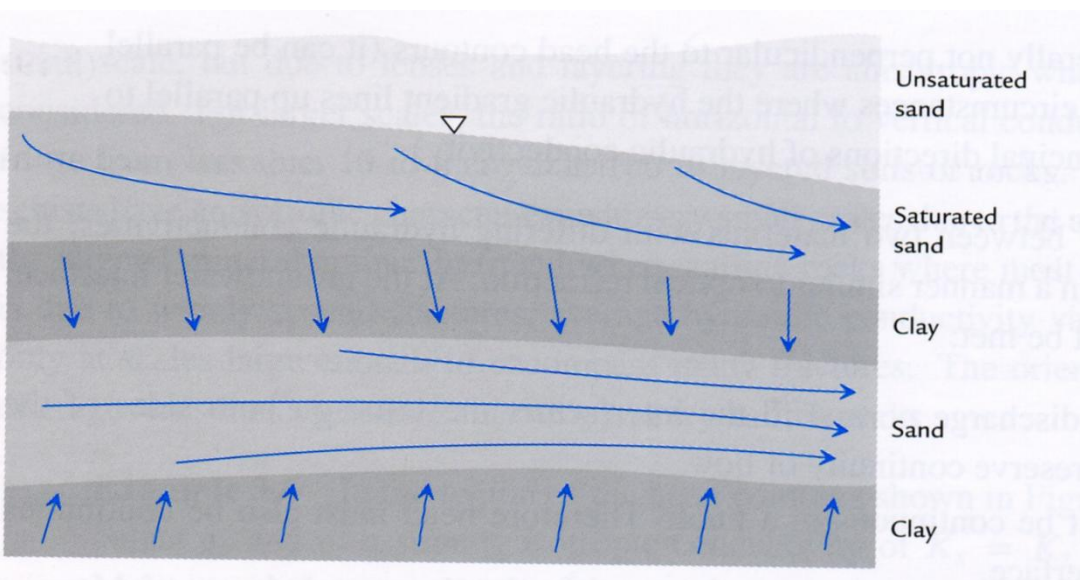
μ – vedeliku viskoossus, [kg/m*sek] [Pa/sek]

Laminaarse voolamine on juhul, kui $R_e < 1 \dots 10$

Homogeense ning isotroopse keskkond

Heterogeenses pinnases filtratsioonimooduli K [m/d], väärtus on väga varieeruv.

Anisotroopses pinnases filtratsioonimooduli suund on muutuv.



Vee liikumine anisotroopses pinnases

Pinnasevee voolamine mõranenud kivimites

Mõranenud kivimites on voolamisprotsesside jälgimine ja analüüsimine mitmel põhjusel raskendatud:

- a) keeruline on kindlaks teha mõrade orientatsiooni ja paigutust,
- b) suuremates pragudes tekib turbulentne voolamine.

Pinnasevee voolamist vaadeldakse sellisel juhul makroskoopilisemalt.

Erineva tihedusega põhjavee voolamine

Filtratsioonimoodul on sõltuvuses vedeliku tihedusest

$$K = \frac{k\rho}{\mu}$$

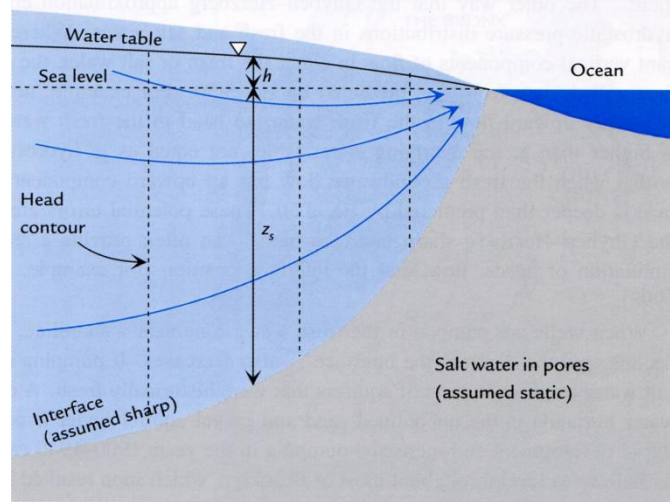
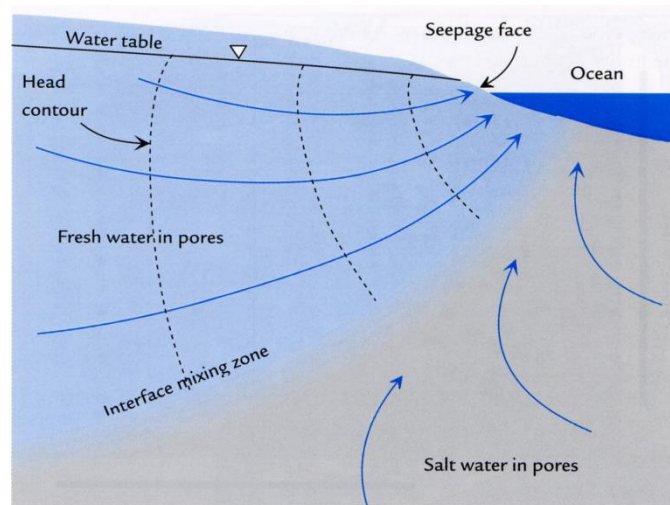
K – filtratsiooni moodul, [m/d], [cm/sek]

k – kivimi sisemine läbilaskvus, [cm²]

(Kivimi läbilaskvus on empiiriline parameeter, ühikuks on darsi, =1 μm², on suurem suuremate pooride korral)

μ – viskoossus, [kg/m*sek] [Pa/sek]

ρ_w – vee tihedus, [g/cm³]



Mageda ning soolase
pinnasevee piir rannikul

$$Z = 40h$$

Z – mageda ja soolase vee piiri
sügavus merepinnast, [m]
 h – pinnasevee kõrgus
merepinnast, [m]