

Jure Ravnik

Matematično modeliranje pojavov v okolju

Jure Ravnik: Matematično modeliranje pojavov v okolju
©2012 Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

Naslov publikacije: Matematično modeliranje pojavov v okolju
Vrsta publikacije: učbenik
Avtor: doc. dr. Jure Ravnik
Recenzenta: prof. dr. L. Škerget
prof. dr. B. Širok
Izdelava slik: Jure Ravnik z Xfigom
Stavil: Jure Ravnik z L^AT_EXom
Oblikovanje ovitka: Neva Ravnik Witjes
Cena: 19,00 €
Leto izdaje: 2012

Brez pisnega dovoljenja avtorja in založnika reproduciranje, distribuiranje, javna priobčitev, prevajanje v druge jezike ali predelava tega avtorskega dela in njegovih delov v kakršnem koli obsegu ali postopku, vključno s fotokopiranjem, tiskanjem ali shranjevanjem v elektronski obliki, ni dovoljeno!

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

519.87:502(075.8)

RAVNIK Jure
Matematično modeliranje pojavov v okolju /
Jure Ravnik. – Maribor : Fakulteta za strojništvo, 2012

ISBN 978-961-248-324-1
COBISS.SI-ID 68834305

Vsebina

Seznam pogosteje uporabljanih oznak	5
Seznam zgledov	7
1 Uvod	9
2 Difuzija	17
2.1 Uvod	17
2.2 Fickov zakon/model difuzije	18
2.3 Difuzijska enačba	20
2.4 Difuzija iz točkovnega izvora	24
2.5 Robni pogoji	36
2.5.1 Neprepustni rob	37
2.5.2 Koncentracija je nič	38
2.5.3 Več robov	39
2.5.4 Več dimenzij	41
2.5.5 Čas premešanja	42
3 Prenosna enačba	47
3.1 Integralska oblika	47
3.2 Diferencialna oblika	50
3.3 Difuzija in konvekcija pri kratkotrajnem točkovnem izpustu .	53
3.3.1 Ena dimenzija	54

3.3.2	Dve dimenziji	65
3.3.3	Tri dimenzije	77
3.4	Difuzija in konvekcija pri dolgotrajnem točkovnem izpustu . .	91
3.4.1	Ena dimenzija	91
3.4.2	Dve dimenziji	96
3.4.3	Tri dimenzije	98
3.4.4	Časovni razvoj	103
4	Turbulentni tok	107
4.1	Osnove	107
4.2	Turbulentna prenosna enačba	116
5	Disperzija	125
5.1	Uvod	125
5.2	Disperzijska prenosna enačba	128
5.3	Izpeljava disperzijskega koeficienta	130
6	Izvori in ponori snovi	139
6.1	Uvod	139
6.2	Reakcije prvega reda	140
6.2.1	Difuzija snovi, ki reagira	142
6.2.2	Difuzija in konvekcija snovi, ki reagira	143
6.3	Raztapljanje	148
6.3.1	Turbulentni tok	149
6.3.2	Laminarni tok	153
6.3.3	Izbira modela raztapljanja	155
6.4	Izmenjava na gladini vode	156
6.4.1	Model tankega filma za izmenjavo na gladini vode . .	157
6.4.2	Model površinske obnove za izmenjavo na gladini vode	161
6.5	Izmenjava na meji trdno – tekoče	167
7	Prenos delcev	175
7.1	Uvod	175
7.2	Disperzni tok	176
7.3	Gibalna enačba	178
7.3.1	Odzivni čas	183
7.3.2	Hitrost posedanja	185
7.3.3	Brezdimenzijska oblika	187
7.4	Difuzija delcev	189

7.5	Posedanje delcev	190
7.5.1	Posedanje pri počasnem mešanju	191
7.5.2	Posedanje pri močnem mešanju	191
7.5.3	Izbira modela posedanja	192
8	Podtalnica	195
8.1	Uvod	195
8.2	Osnove toka	196
8.2.1	Darcyjev zakon	199
8.2.2	Hitrost toka podtalnice	202
8.2.3	Uporaba kart višine podtalnice	205
8.3	Diferencialni pristop	209
8.3.1	Črpališče	214
8.4	Zaostajanje pri prenosu onesnaženja	218
8.5	Anizotropni in nehomogeni vodonosnik	221
8.5.1	Difuzijska enačba za nehomogeni anizotropni vodonosnik	225
9	Ozračje	229
9.1	Uvod	229
9.2	Fizikalne osnove	231
9.3	Gibanje zračnih mas	233
9.4	Kemijske reakcije onesnaževal v ozračju	239
9.5	Simulacija razširjanja z dostopno programsko opremo	242
10	Numerično modeliranje	251
10.1	Uvod	251
10.2	Aproksimacija odvodov	253
10.3	Laplaceova enačba z metodo končnih razlik	256
10.3.1	V eni dimenziji	257
10.3.2	Reševanje sistema linearnih enačb	258
10.3.3	V več dimenzijah	259
10.4	Interpolacija	264
10.5	Laplaceova enačba z metodo končnih elementov	267
10.6	Laplaceova enačba z metodo robnih elementov	272
10.6.1	Fundamentalna rešitev Laplaceove enačbe	272
10.6.2	Integralski zapis Laplaceove enačbe za metodo robnih elementov	274
10.7	Prenosna enačba	278
10.8	Validacija	281

10.8.1	Difuzija v nehomogeni snovi	282
10.8.2	Difuzija z nelinearno difuzivnostjo	282
10.8.3	Vstopni problem	283
10.8.4	Časovno odvisno reševanje difuzijske enačbe	284
10.8.5	Reševanje enačbe nihanja	285
	Literatura	287
	Stvarno kazalo	292

Seznam pogosteje uporabljenih oznak

Grške črke

α	prostorninski delež, [-]
Γ	rob območja Ω
δ_s	debelina viskoznega podsloja, [m]
δ_c	debelina koncentracijske mejne plasti, [m]
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	razdalje v smereh, [m]
ϵ	hrapavost, [m]
ν	kinematična viskoznost, [m ² /s]
$\pi = 3,141592$	razmerje med obsegom in premerom kroga, [-]
ρ	gostota, [kg/m ³]
σ	standardna deviacija, [-]
τ	čas, [s]
τ_s	napetost na steni, [N/m ² = kg/(m·s ²)]
φ	poroznost, [-]
Ω	območje

Latinske črke

\vec{a}	pospešek, [m/s ²]
A	površina, [m ²]
b	širina, [m]
C	koncentracija, [kg/m ³]
c_p	specifična toplota pri konstantnem tlaku, [J/kgK]
c_d	koeficient upora, [-]
d	debelina, premer, [m]
D	difuzivnost, [m ² /s]
D_t	turbulentna difuzivnost, [m ² /s]
D_m	molekularna difuzivnost, [m ² /s]
$e = 2,71828$	osnova naravnega logaritma, [-]
\vec{F}	sila, [N]
\vec{F}_g	teža, [N]
\vec{F}_u	sila upora, [N]
\vec{F}_v	sila vzgona, [N]
f	mobilni delež adsorbenta, [-]
$\vec{g} = 9,81 \text{ m/s}^2$	gravitacijski pospešek
$h, \Delta h$	višina, razlika višin, [m]
i	hidravlični gradient, [-]
\vec{I}	izvori snovi, [kg/(m ³ s)]
j	specifični tok snovi, [kg/m ² s]
$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	Boltzmannova konstanta, [J/K]
k	hitrost reakcije, [s ⁻¹]

k_H	Henryjeva konstanta, [–]
\mathcal{K}	hidravlična prepustnost, [m/dan]
K	disperzijski koeficient, [m ² /s]
K_d	distribucijski koeficient, [m ³ /kg]
l	dolžina, [m]
\mathcal{L}	karakteristična dolžina, [m]
m	masa, [kg]
\dot{m}	tok snovi, [kg/s]
n	celo število, [–]
\vec{n}	normala (enotski vektor pravokoten na površino)
o	obseg, [m]
\dot{Q}	toplotni tok, [W]
\vec{q}	gostota toplotnega toka, [W/m ²]
r	polmer, [m]
R	faktor zaostajanja onesnaženja v podtalnici, [–]
$t, \Delta t$	čas, časovni korak, [s]
$t_{1/2}$	razpolovni čas, [s]
T	temperatura, [K]
\vec{v}, \vec{u}	hitrost, [m/s]
v^*	torna hitrost, [m/s]
v_s	hitrost posedanja, [m/s]
\dot{V}	prostorninski pretok, [m ³ /s]
V	prostornina, [m ³]
v^+	brezdimenzijska hitrost, [–]
x, y, z	osi koordinatnega sistema, [m]
y^+	brezdimenzijska oddaljenost od stene, [–]

Kriterialna števila

Pe	Pecletovo število
Re	Reynoldsovo število
St	Stokesovo število

Posebni znaki

$\vec{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$	operator nabra
\cdot	skalarno množenje
\times	vektorsko množenje
\otimes	tenzorsko vektorski produkt

Seznam zgledov

Fickov zakon	20
Difuzija v 1D kanalu	30
Difuzivnost ozračja	35
Difuzija v omejenem prostoru	43
Elektrarna ob reki	48
Difuzija in advekcija v kanalu	62
Difuzija in advekcija v dvodimenzionalnem sistemu	74
Okvara na napravi za čiščenje dimnih plinov	84
Potok, onesnažen s pesticidi	94
Dimnik v termoelektrarni	101
Hitrostni profil v reki	121
Vpliv rečnega padca na disperzijo	136
Barvilo v kanalu z disperzijo	137
Razpad trikloroetena v ozračju	144
Raztapljanje sadre	151
Izhajanje trikloroetena iz jezera v ozračje	160
Iskanje virov onesnaženja v potoku	165
Toluen v podtalnici	171
Odzivni čas in hitrost posedanja delcev	186
Odpadne vode z gradbišča	193
Tok podtalnice v prodnatem vodonosniku	204
Uporaba kart višin podtalnice	207
Črpanje podtalnice	216
Anizotropna hidravlična prevodnost	223
Razširjanje iz dimnika v nestabilno ozračje	236
Laplaceova enačba z metodo končnih razlik	263

Do tega poglavja smo v knjigi obravnavali mehanizme prenosa onesnaževala v okolju in se nismo preveč ozirali na medij, ki je onesnažen. Ločili smo eno-, dvo- in trodimenzionalne primere, nismo pa se posebej ukvarjali z zakonitostmi, ki so značilne za posamezni primer. V tem in v naslednjem poglavju bomo splošne rezultate, izpeljane na začetku knjige, priredili za uporabo na praktičnih primerih prenosa onesnaženja v podtalnici in zraku.

8.1 Uvod

Vsi vemo, da če v tla izkopljemo luknjo, prej ali slej najdemo vodo. Zadnje drži ne glede na to, kje kopljemo: doma na vrtu, v središču mesta ali na deželi. Voda je lahko le nekaj decimetrov pod površjem ali pa nanjo naletimo šele v zelo globokih vrtinah. Zgodi se celo, da je treba prevrtati skozi neprepustno skalnato osnovo, preden naletimo na vodo. Kakor koli, prej ali slej naletimo na tako imenovano nasičeno območje, v katerem so vse pore, razpoke in prostori v zemlji zapolnjeni z vodo. Vodo v tem območju imenujemo podtalnica.

Podtalnica teče. Hitrost toka je veliko manjša od toka v potoku ali reki, znaša lahko le nekaj decimetrov ali metrov na dan. Ne glede na počasni tok pa je pomembno, da se podtalnica premika. Če pride do onesnaženja, na primer razlitja nevarne snovi, bo podtalnica onesnaženje raznesla po okolici. Zamislimo si na primer rezervoar za gorivo na bencinski črpalki, ki počasi spušča. Pretok goriva v zemljo je zelo majhen, takšen, da ga zaposleni na črpalki ne opazijo. Gorivo potuje navzdol skozi nenasičeno zemljino in doseže podtalnico. Tudi če podtalnica teče počasi, recimo nekaj metrov na dan, bo

v enem letu onesnaženje prenesla kilometer daleč. Če je na poti črpališče pitne vode, bo prišlo do onesnaženja pitne vode in s tem do resne nevarnosti za zdravje ljudi. Še bolj nevarna je možnost, da bo podtalnica gorivo odnesla mimo domačih vrtov, kjer si vrtničkarji črpajo vodo za zalivanje vrta iz lastnih vodnjakov.

Razmislimo še, kaj bi se zgodilo, ko bi takšno onesnaženje odkrili. Kako bi potekala sanacija? Morda bi lahko zemljino v najbližji okolici rezervoarja izkopali in odstranili. Drugega dela onesnaženja pa zaradi velike površine gotovo ne bi mogli sanirati. Posledice takšnega onesnaženja bi tako vplivale na zdravje ljudi in na vrednost zemljišč. Treba bi bilo poiskati nove vodne vire.

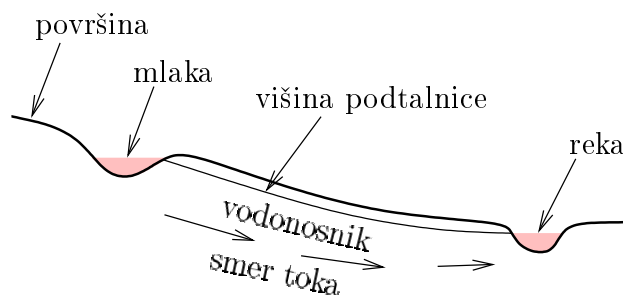
Do onesnaženja podtalnice lahko pride tudi zaradi iztekanja iz deponij, in to tako komunalnih kot nevarnih odpadkov. Tudi dež, ki izpira olja in gorivo s cest, prispeva k onesnaženju. Rezervoarje za gorivo in druge nevarne snovi najdemo praktično po vseh domovih, šolah in drugih stavbah.

Zaradi navedenega je razumevanje toka podtalnice in prenosa onesnaževal v njej pomembno za oceno okoljske nevarnosti za praktično vse človeške dejavnosti. Znanje o tej temi je pomembno tako za znanstvenike in inženirje kot tudi za uslužbence v javni upravi, ki izdajajo okoljevarstvena soglasja in naročajo študije vplivov na okolje.

Dogajanje v podtalnici je skrito očem. Vrtanje vrtin in analize vode so drage ter zamudne, zato so matematični modeli glavno orodje, ki nam pomaga odkriti smer in hitrost toka ter omogoča napoved koncentracijskih polj.

8.2 Osnove toka

Povedali smo že, da vodo pod površjem najdemo praktično povsod. V vsaki zemljini pod površjem se nahaja določen del por in razpok, ki jih voda lahko napolni. Padavine in dotok iz površinskih vodotokov poskrbijo, da se pore v plasti zemljine napolnijo. Nadmorski višini, do koder voda napolni zemljino, pravimo višina podtalnice. Plast zemljine pod površino, skozi katero potuje podtalnica, pa je vodonosnik. Na sliki 8.1 je prikazan primer vodonosnika in podtalnice v njem. Vidimo višino podtalnice in smer toka. Podtalnico napaja višje ležeča mlaka. Poleg dotoka in mlake podtalnico napajajo tudi padavinske vode, ki padejo na površino. Seveda do podtalnice ne pride vsa padavinska voda. Del je izhlapi, del pa je porabi rastlinje za rast. Ta dva procesa imenujemo evaporacija in transpiracija, skupno kar evapotranspiracija. Del padavinske vode v obliki potokov odteče proti nižje ležeči reki.



Slika 8.1: Primer vodonosnika, ki ga napaja višje ležeča mlaka. Podtalnica teče navzdol in napaja nižje ležečo reko.

Zadnji del padavinske vode pa napaja podtalnico. V vodonosniku podtalnica teče proti dolini in tam napaja reko. Reka torej služi kot ponor podtalnice. Seveda je mogoče, da reka nižje v toku, ko se geološke razmere spremenijo, spet služi kot vir vode za podtalnico.

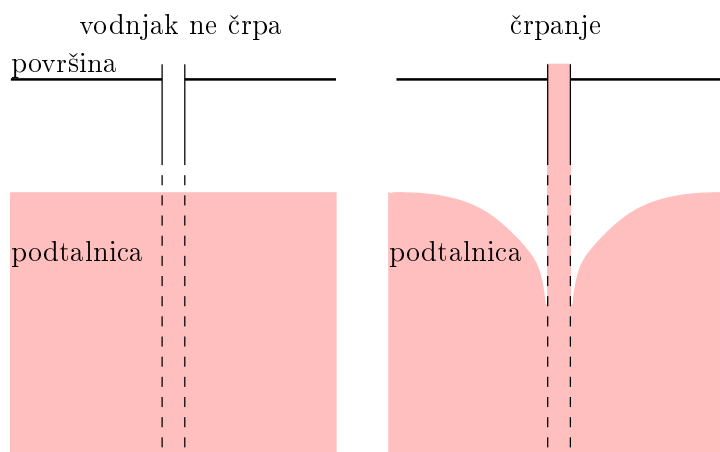
Opisana razmerja med podtalnico v vodonosniku in površinskimi vodami so pomembna za razumevanje razširjanja onesnaženja. Tako na primer lažje razumemo situacijo, v kateri ugotovimo onesnaženje vode v reki in na obalah ne moremo najti vira onesnaženja. Do onesnaženja je lahko prišlo kjer koli na površini. Padavine so onesnaženje sprale v podtalnico, ta pa ga je prenesla do reke. Še več, zaradi počasnega toka podtalnice je lahko onesnažena reka posledica kombinacije večjega števila virov onesnaženja na površini.

Na sliki 8.1 smo skicirali precej poenostavljen model. Pod površino smo prikazali del zemljine, ki ni zasičen z vodo, in še globlje del, ki je zasičen z vodo. Navadno je ta preprosta predstava ustrezna za izgradnjo modela toka. V resnici je seveda geološka struktura pod površino veliko bolj zapletena. Pri vrtanju pod površino naletimo na različne plasti, ki jih sestavljajo različne zemljine. Lastnosti plasti so različne. Ločijo se po kemijski sestavi, porazdelitvi velikosti zrn, prisotnosti organskega materiala in drugih lastnostih. Za tok podtalnice je najpomembnejša velikost zrn. Kot primer lahko naštejemo prod, pesek, mulj in glino, ki se zelo razlikujejo po velikosti zrn. Ko prevrtamo te zgornje vodonosne plasti, navadno naletimo na neprepustno podlago. Kot že ime pove, je to geološka plast, ki je za vodo bolj ali manj neprepustna. Pri modeliranju navadno neprepustno podlago obravnavamo kot neprepustno za vodo, v resnici pa ni vedno tako. Neprepustna podlaga iz peščenjaka ima delno porozno strukturo, ki dovoljuje nekaj pretoka vode. Pri apnencu pa velikokrat najdemo razpoke, ki so dovolj povezane, da podtalnica najde pot skozenj. Povezane razpoke redkeje, a vseeno, najdemo tudi

pri neprepustni podlagi iz granita.

Struktura vodonosnika je največkrat prodnata ali peščena, neprepustna podlaga pa je iz apnencev, peščenjaka ali granita. Najdemo pa tudi dele vodonosnika nad neprepustno podlago, skozi katere podtalnica težko ali pa sploh ne teče. Te dele navadno sestavljajo gline in fini mulji ali pa vključki kamnin, kot so skrilavci in granit. Poznani so tudi primeri, ko je cel vodonosnik zaprt med dve za vodo neprepustni plasti.

Na tok podtalnice poleg geološke strukture zemljine in razmerja med dotoki ter odtoki vpliva tudi človek s svojimi posegi. Meliorizacija površinskih vodotokov ima velik vpliv na komunikacijo med površinsko vodo in podtalnico. S takšnim posegom se spremeni dotok oziroma odtok podtalnice, ki posledično vpliva na višino, pretok in smer toka. Velik vpliv na tok podtalnice imajo tudi vodnjaki, iz katerih podtalnico črpamo. Vpliv je skiciran na sliki 8.2. Vidimo, da ob črpanju vodnjak potegne vase podtalnico



Slika 8.2: Vpliv črpanja na višino podtalnice. Ko črpališče obratuje, gladina podtalnice okoli vodnjaka zavzame stožčasto obliko.

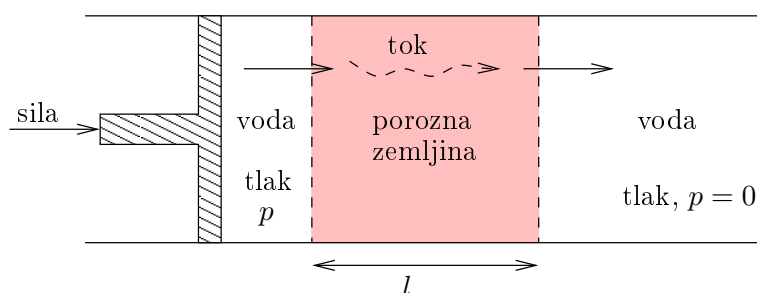
iz vseh smeri. Zato se gladina podtalnice oblikuje v obliko stožca in teče proti vodnjaku iz vseh smeri. Zgodi se torej lahko, da se ob zagonu vodnjaka tok podtalnice tako spremeni, da proti črpališču potegnemo tudi onesnaženo podtalnico, ki bi sicer odtekla mimo.

V splošnem nas za oceno obnašanja onesnažene podtalnice zanimata odgovora na dve vprašanji. Najprej nas zanima, koliko podtalnice teče skozi vodonosnik. Ta podatek je pomemben, saj ga potrebujemo za izračun koncentracije onesnaževala. Višina koncentracije pa je odločilnega pomena za

sprejemanje odločitev o morebitnih ukrepih. Je voda tako onesnažena, da ni več pitna? Je koncentracija tako majhna, da je merilna sonda ne zazna? Drugo vprašanje, na katerega si želimo odgovor, pa je, kako hitro podtalnica teče. Hitrost in smer toka sta odločilni za oceno smeri razširjanja ter velikosti onesnaženega območja. Odgovora na obe vprašanji bomo poiskali v naslednjem razdelku.

8.2.1 Darcyjev zakon

Darcy¹ je v sredini devetnajstega stoletja razvijal sistem za filtriranje pitne vode za mesto Dijon v Franciji. Zanimalo ga je, koliko vode lahko z določeno hitrostjo potuje skozi peščeni filter. V ta namen je izvajal poskuse z merilno progo, ki je prikazana na sliki 8.3. Z batom potiskamo vodo skozi plast porozne zemljine in merimo pretok v odvisnosti od tlačne razlike ter dolžine vzorca zemljine. Darcy je ugotovil, da se pretok skozi zemljino podvoji, če



Slika 8.3: Poskus, s katerim vpeljemo Darcyjev zakon. Z batom potiskamo tekočino skozi porozno zemljino.

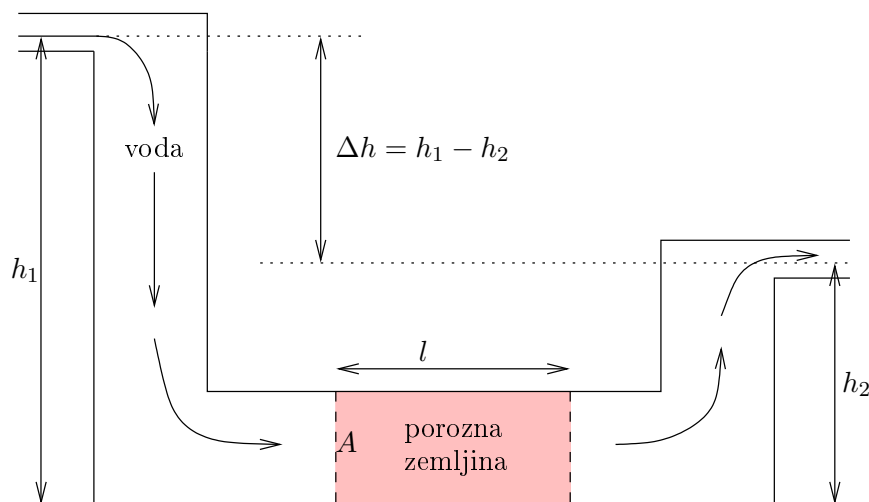
dvakrat poveča tlačno razliko. Pretok je torej sorazmeren s tlačno razliko. Z večjim tlakom kot potiskamo tekočino skozi porozno snov, večji je pretok. Nadalje je Darcy primerjal pretok pri dveh različno dolgih vzorcih in enaki tlačni razliki. Ko povečamo dolžino, skozi katero potiskamo tekočino, se poveča upor proti tečenju in pri enaki tlačni razliki pričakujemo manjši pretok. Darcy je izmeril, da se pretok dvakrat zmanjša, če uporabimo dvakrat daljši vzorec. Pretok je torej obratno sorazmeren z dolžino vzorca.

Darcy je spreminjal tudi presek zemljine. S tem je poskušal ugotoviti, kako na pretok vpliva količina vode, ki teče. Ugotovitev je bila pričakovana –

¹Henry Darcy (1803–1858), francoski inženir

obnašanje toka je neodvisno od količine vode, pretok pa je seveda sorazmeren s površino preseka zemljine.

V naravi skozi vodonosnik podtalnice ne potiskamo z batom, zato je Darcy poskus nekoliko preoblikoval. Shematsko je prikazan na sliki 8.4. Izdelal je kanal, v katerega voda vstopa pri višini h_1 in izstopa nižje pri višini h_2 . Ker je razlika višin sorazmerna z razliko tlakov ($\Delta p = \rho g \Delta h$), veljajo za razliko višin enake ugotovitve kot za razliko tlakov. Pri dvakrat višji razliki višin je pretok namreč dvakrat večji oziroma je sorazmeren z razliko višin. Opazovanja in meritve je Darcy povezal v enačbo, ki jo imenujemo Darcyjev



Slika 8.4: Poskus, s katerim vpeljemo Darcyjev zakon. Voda teče zaradi razlike višin.

zakon. Zapisal jo je takole:

$$\dot{V} = \mathcal{K} A \frac{\Delta h}{l}, \quad (8.1)$$

kjer so \dot{V} pretok podtalnice v litrih na sekundo ali kubičnih metrih na uro, l dolžina vodonosnika, Δh razlika v izmerjeni višini podtalnice na dveh mestih v vodonosniku, ki sta oddaljeni l , in A presek vodonosnika. Sorazmernostno konstanto smo označili s \mathcal{K} . Imenujemo jo hidravlična prevodnost, redkeje tudi Darcyjev koeficient ali koeficient hidravlične prevodnosti. Hidravlična prevodnost ima enoto dolžina na čas. V preglednici 8.1 navajamo poroznost in hidravlično prevodnost za nekaj vrst zemljin. Prevodnost, navedena tu,

velja za porozne snovi. V primeru prisotnosti večjega števila razpok in kanalov, ki omogočajo hitrejši tok skozi zemljino, je vrednosti za hidravlično prevodnost treba popraviti.

Zemljina	Poroznost φ	Hidravlična prevodnost \mathcal{K} [m/dan]
prod	0,25–0,4	30–30000
pesek	0,25–0,5	0,003–300
mulj	0,35–0,5	$3 \cdot 10^{-5}$ –0,03
glina	0,4–0,7	$3 \cdot 10^{-8}$ – $3 \cdot 10^{-4}$
peščenjaka	0,05–0,3	$3 \cdot 10^{-6}$ –0,03
apnenec	0,001–0,2	$3 \cdot 10^{-5}$ –0,03
granit	0,0001–0,1	$3 \cdot 10^{-5}$ –3

Tabela 8.1: Poroznost in hidravlična prevodnost za nekaj vrst zemljin.

Pri vpeljavi Darcyjevega zakona smo ugotovili, da je pretok podtalnice odvisen od kvocienta med razliko višine podtalnice in razdaljo, na kateri je bila ta razlika izmerjena. Ta kvocient imenujemo hidravlični gradient in ga označimo z i :

$$i = \frac{\Delta h}{l}. \quad (8.2)$$

Ko ga uporabimo v Darcyjevem zakonu (enačba 8.1), se ta poenostavi v:

$$\dot{V} = \mathcal{K}iA. \quad (8.3)$$

Obravnavo nadaljujemo s skico na sliki 8.5. Na njej je prikazan vodonosnik pod površjem, v katerega smo izvrtali dve vrtini. V vrtinah lahko merimo nivo gladine podtalnice. Uporabimo lahko merilni tlak, ki nas z zvočnim signalom opozori, da smo dosegli vodo. Lahko uporabimo tudi tlačne sonde, ki se potopijo v podtalnico v vrtini in s pomočjo meritve tlaka ugotovijo, kolikšna je višina podtalnice. Kakor koli, v obeh vrtinah smo izmerili višino podtalnice. Meritev je izvedena kot razdalja od kape vrtine do gladine vode. Če želimo višino podtalnice na različnih vrtinah medsebojno primerjati, jih moramo preračunati v absolutni koordinatni sistem. Navadno razpolagamo z geodetskim posnetkom nadmorske višine kape vrtine. Višino podtalnice izračunamo kot razliko med nadmorsko višino kape vrtine in razdaljo med kapo ter gladino podtalnice.

Sta ti meritvi dovolj za izračun pretoka podtalnice iz Darcyjevega zakona? Z razliko višin podtalnice na obeh vrtinah in z razdaljo med vrtinama lahko izračunamo hidravlični gradient. Za pretok pa potrebujemo še površino preseka vodonosnika. Globino do neprepustne podlage navadno navaja

- dušikovi oksidi, 238
- efektivna višina dimnika, 232
- ekološka nesreča, 10
- enačba
- integralska, 13, 47
 - navadna diferencialna, 13, 183
 - parcialna diferencialna, 13, 251
- evaporacija, 196
- evapotranspiracija, 196
- faktor zaostajanja, 218
- Fickov zakon, 18, 20, 125, 148, 158
- flokule, 186
- fosilna goriva, 10
- foton, 240
- fotosinteza, 240
- freon, 144
- Gauss-Jordanova eliminacija, 258
- Gauss-Seidelov algoritem, 259
- glina, 197
- granit, 198
- Henryjev zakon, 156
- Henryjeva konstanta, 156
- tabela, 157
- hidravlična prevodnost, 200
- hidravlična višina, 209
- hidravlični gradient, 201
- hitrost posedanja, 185
- hitrost reakcije, 140
- hitrostni profil, 116, 128
- ISCST3, 245
- jezero, 160
- kalcij, 151
- kalcijev hidroksid, 240
- kemijska reakcija, 139
- kisel dež, 240
- kisik, 157
- klorofluoroogljikovodiki, 10, 230, 241
- koeficient hidravlične prevodnosti, 200
- koeficient upora, 179
- koncentracija
- masna, 177
- konvekcija, 17
- Krylov podprostor, 259
- Laplaceova enačba, 213
- lindane, 157
- mešalna dolžina, 117
- mejna plast
- debelina, 154
 - koncentracijska, 154
- meliorizacija, 198
- metoda
- končnih elementov, 267, 278
 - končnih razlik, 256
 - robnih elementov, 272
- mikroorganizmi, 139
- mobilni delež adsorbenta, 169, 220
- model
- časovno neodvisen, 13
 - časovno odvisen, 13
 - linearen, 15
 - nelinearen, 15
- morje, 17
- mulj, 197
- nabla, 213
- nafta, 17
- nasičeno območje, 195
- neprepustna podlaga, 197
- oblak onesnaženja
- nestabilen, 234
 - stabilen, 233
- odvod
- aproksimacija, 253

- odzivni čas, 183
 ogljikov dioksid, 11, 101, 157, 240
 organske snovi, 139
 ozon, 157, 239
- parameter, 13
 parcialni tlak, 156
 peščenjak, 197
 pesek, 197
 pesticidi, 10
 podtalnica, 9, 17, 167, 195
 - višina, 196
 porazdelitveni koeficient, 167, 220
 poroznost, 168
 potok, 151
 povratni tok, 178
 prenosna enačba
 - konvektivno-disperzijska, 130
 - turbulentna, 117
 prenosni pojav, 17
 prod, 197
 propan, 157
- računska mreža, 251
 radioaktivni razpad, 139
 Raoultov zakon, 156
 ravnotežna koncentracija, 148
 razpolovni čas, 141
 raztapljanje, 148
 - hitrost, 150
 recirkulacija, 178
 red aproksimacije, 255
 reka, 48
 retardacija, 218
 Reynoldsova dekompozicija, 109
 Reynoldsovo število, 108, 178
 - kritično, 181
 rezervoar, 9
 roža vetrov, 101
 robni pogoj, 252
- Dirichletov, 252
 Neumannov, 252
- sadra, 151, 240
 sila
 - upora, 178
 simulacija
 - stacionarna, 252, 253
 - tranzientna, 253
 simulacija velikih vrtincev, 109
 sistemi iterativnih enačb
 - direktno reševanje, 258
 - iterativno reševanje, 259
 sistemska matrika, 258
 skrilavec, 198
 sorpcija, 167
 spremenljivka, 13
 stabilnost
 - ozračja, 234
 Stokes-Einsteinova enačba, 190
 Stokesov zakon, 180
 Stokesovo število, 184
 svetloba, 240
 - ultravijolična, 139
 TAPM, 245
 tekočina
 - nestisljiva, 178
 terminalna hitrost, 185
 termoelektrarna, 101
 tok
 - disperzni, 175
 - laminarni, 107
 - ločeni, 175
 - turbulentni, 107
 - večfazni, 175
 - večsestavinski, 175
 tokovna brazda, 178
 toluen, 157, 171
 topla greda, 241

- torna hitrost, 113
- transpiracija, 196
- trikloroeten, 144, 157, 160, 165
- turbulenca
 - intenzivnost, 111
 - moč, 110
- usedalnik, 191
- usedanje
 - pri šibkem mešanju, 191
 - pri močnem mešanju, 191
- Van der Waals, 167
- višina
 - hidravlična, 209
- vodik, 157
- vodnjak, 171
 - arteški, 209
- vodonosnik, 167, 196
 - arteški, 209
 - odprt, 209
 - zaprt, 209
- von Karman, 178
- vozlišče, 251
- začetni pogoj, 252
- zaostajanje onesnaženja, 218
 - faktor, 218
- zaustavitveni kriterij, 259
- zemljina, 197
- zračna masa
 - nestabilna, 233
 - stabilna, 233
- žveplena kislina, 240
- žveplo, 240