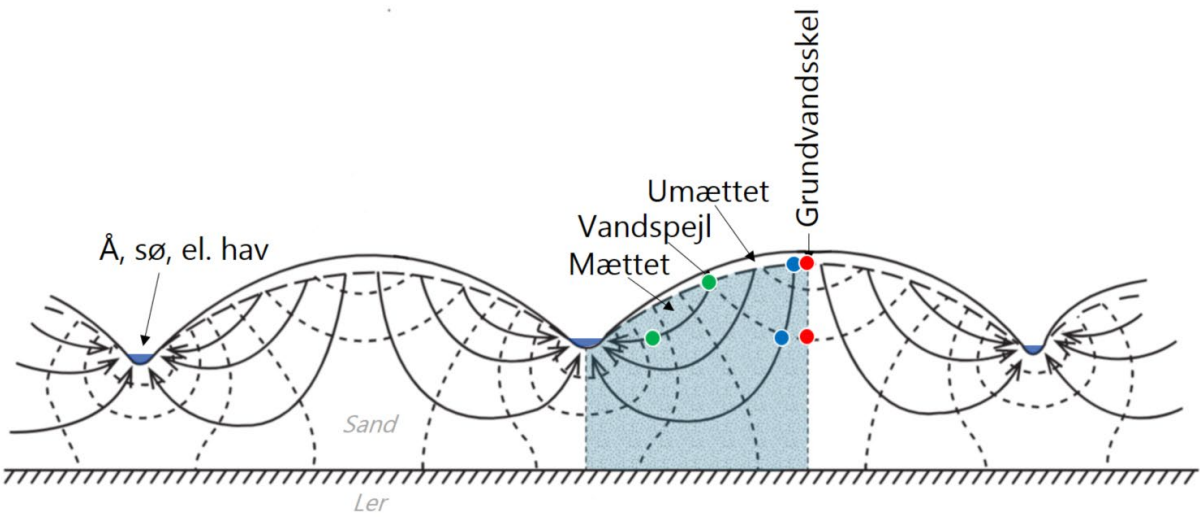
GeoCase — Instruktion og opgaver

11. oktober 2023

Søren Jessen (sj@ign.ku.dk)



Indhold

Materialer og betegnelser (Figur 1, 2 og 3) side 2

Klargøring af kolonneopstilling side 5

Nedpakning af kolonneopstilling side 6

Formelgrundlag: Darcys lov side 7

BOX 1 Mikroopgaver om hydraulisk trykniveau side 9

Porøsitet og strømningshastighed side 10

Eksperiment 1: Måling af hydraulisk ledningsevne og eftervisning af Darcys lov side 11

Eksperiment 2: Måling af porevandshastighed og porøsitet side 14

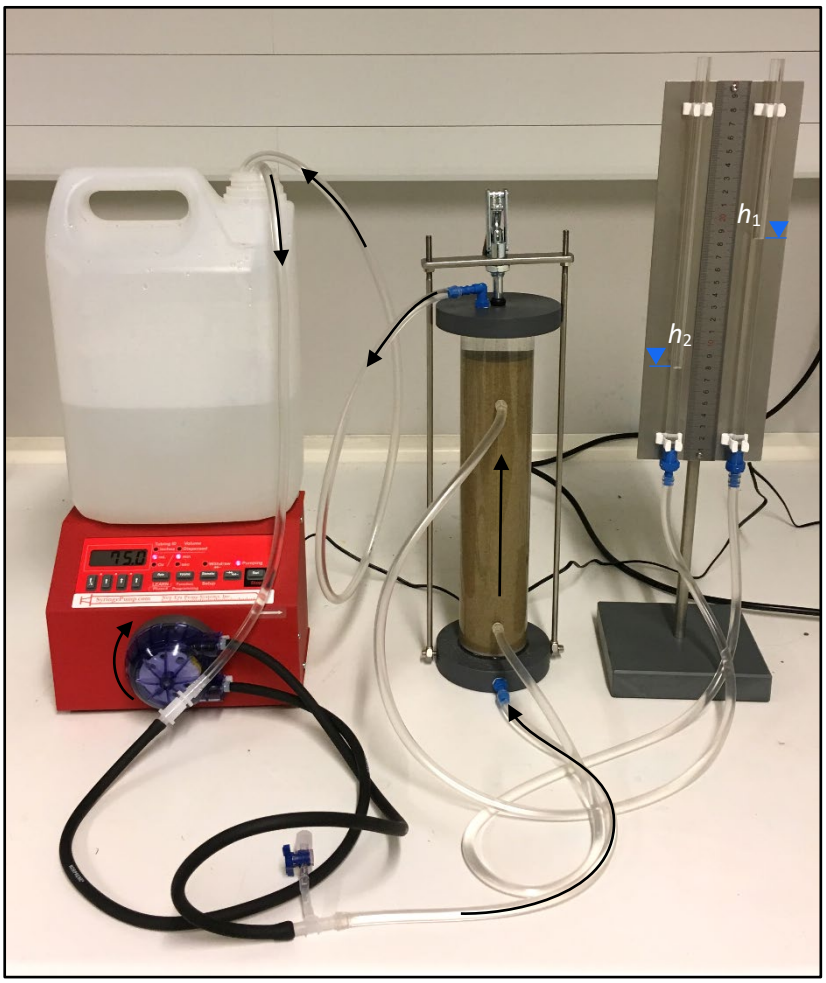
Anvendelsesøvelse 1: Beregning af en forurenings hastighed side 16

Tre idéer til andre anvendelser, SRP-opgaver, og fagkombinationer side 19

BOX 2 Tidsserie af kvælstof i vandløb side 21

GeoCase

Grundvand og hydrogeologi



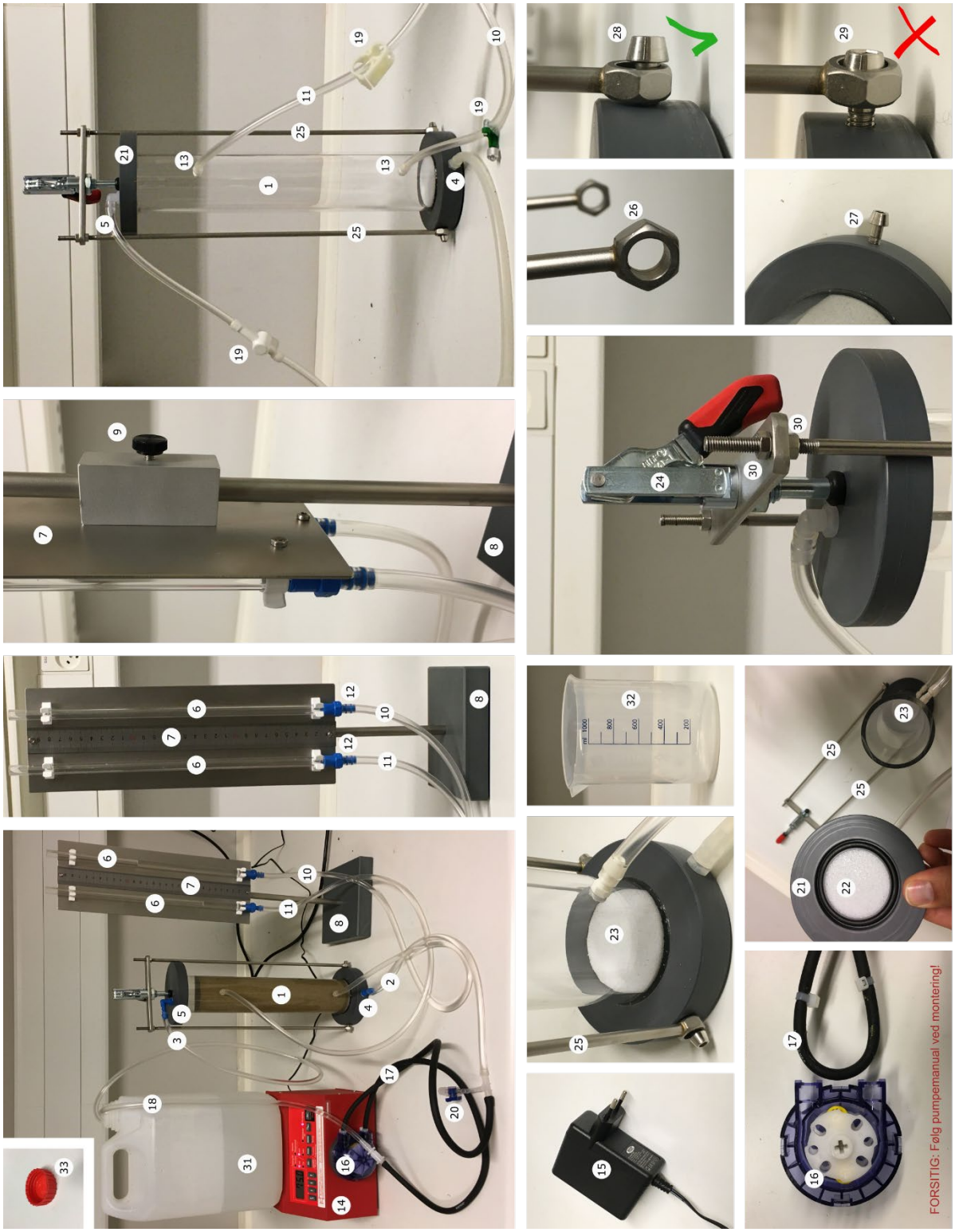
Figur 1 Kolonneopstillingen i drift. Vandet løber fra reservoiret til pumpen, og videre ind i bunden af kolonnen. Når vandet har passeret op gennem kolonnen løber det retur til reservoiret. Forskellen i hydraulisk trykniveau ($h_2 - h_1$) kan aflæses på en lineal fra vandstandene i stigrørene. Med pumpen kan vandfluxen måles. De samhørende værdier af vandflux og hydraulisk trykniveau-forskel bruges til at bestemme kolonnesandets hydrauliske ledningsevne.

Materialer og betegnelser (Figur 1, 2 og 3):

1. Kolonne
2. Indløbsslange (A)
3. Udløbsslange (B)
4. Indløbsstuts
5. Udløbsstuts
6. Stigrør
7. Stigrørsholder m. lineal
8. Stigrørsfod
9. Højdejusteringsskrue
10. Højre stigrørsslange (C)
11. Venstre stigrørsslange (D)
12. Stigrørsstutse
13. Sidestutse
14. Peristaltisk pumpe
15. Strømforsyning
16. Pumpehovede
17. Pumpeslange (E)
18. Reservoir-til-pumpe slange (F)
19. Slangelukkere
20. Ventil til tilsætning af sporstof
21. Topstykke til kolonnen
22. Vyonfilter (top)
23. Vyonflter (bund)
24. Momentlås
25. Kontrastag
26. Kontrastagsøje
27. Kontrastuts
28. Korrekt placering af øje over stuts
29. Forkert placering af øje over stuts
30. Kontramøtrik
31. Reservoir
32. 1000 mL målebæger
33. Låg til reservoir
34. Manual til pumpe + Instruktion
35. Målebæger
36. Brilliant Blue sporstof (blå farve)
37. 10 mL sprøjte
38. Sandprøver
39. Silikonefedt + reservestrips
40. Pose til opbevaring af pumpeslange

For at kunne udføre eksperimenterne i denne instruktion skal du selv medbringe:

1) Vand (gerne med lavt saltindhold, f.eks. destilleret eller osmosebehandlet)
2) Håndklæde/klude/papirservietter



Figur 2 Betegnelser af opstillingsdele.

Figur 3 Betegnelse af opstillingsdele og position i GeoCasen. Pumpeslangen og indløbsslangen ligger under pumpen. Øvrige slanger ligger under kolonnen. Momentlåsen ligger i en 90-graders vinkel således at den ikke er helt låst/sammenpresset i sin opbevaringsposition.

Klargøring af kolonneopstilling

Figur 1 viser en klargjort kolonneopstilling i drift. Dette afsnit beskriver klargøringen.

Pas godt på slangestutsene (4-5, 12-13) under klargøringen, så de ikke knækker: ved samling af en slange med en stuts holdes med tommel og pegefinger om slangen, ca. 1 cm fra slangens ende, og slangen trykkes så på stutsen i et lige tryk. Glid fingrene ned over slangen på stutsen gentagne gange, så slangen arbejdes gradvist på plads. Slangen behøver ikke dække hele stutsen, når blot slangen ikke falder af ved almindelig brug.

I. Forbind indløbsslangen (2) til kolonnens (1) indløbsstuts (4) og udløbsslangen (3) til kolonnens udløbsstuts (5).
II. Forbind højre stigrørsslange (10; den korteste) til den nederste af kolonnens to sidestutse (13). Forbind venstre stigrørsslange (11; den længste) til den øverste af kolonnens to sidestutse (13).
III. Justér højden af stigrørsholderen (9) på stigrørsfoden (8), og stil den til højre for kolonnen.
IV. Fastgør stigrørsslangerne (10-11) med stigrørene (6), og montér stigrørene i klemmerne på stigrørsholderen (9); stigrøret forbundet til nederste sidestuts (13) placeres til højre på stigrørsholderen (9), det andet til venstre.
V. Klargør pumpen (14) ved at følge anvisningerne i manualen til pumpen (34):
   a. Læs i manualen (34) hvordan pumpeslangen (17) monteres i pumpehovedet (16). Sørg for, at pumpeslangen monteres så der vil blive pumpet vand ind i kolonnen når rotoren i pumpehovedet kører i urets retning.
   PAS PÅ: Pumpeslangen er påført **silikonefedt**—undgå berøring med fingrene, og **brug evt. handsker!** Hvis der mangler fedt, **skal nyt kommes på!**
   b. Montér pumpehovedet (16) som på Fig. 2.
   PAS PÅ VED MONTERING AF PUMPEHOVED PÅ PUMPEN: Sørg først for, at drivakslen 'passer' i. Sørg derefter for, at alle tre hæfte-tappe på pumpehovedet fanger deres slidser korrekt!
   c. Læs i manualen hvordan pumpehovedet (16) derefter fastgøres på pumpen (14).
   d. Sæt strømforsyningen (15) i en stikkontakt og slut den til pumpen.
VI. Fyld vand i reservoiret (31) og før den klare del af pumpeslangen (17) ned under vandoverfladen i reservoiret. Placér pumpen, kolonnen, reservoiret, og stigrørsfoden godt i forhold til hinanden, så der sikres gode arbejdsforhold, og pumpeslange bliver i reservoiret.

Fyld sand i kolonnen således:

VII. Læs i manualen til pumpen hvordan pumpen betjenes.
VIII. Tænd for pumpen, så kolonnen fyldes ca. 1/3 op med vand, nedefra, og afbryd pumpen igen. Bemærk: Kolonnen er stadig åben for oven!
IX. Fyld ca. 650 mL tørt sand (f.eks. fra en af sand-prøverne, 38) i målebægeret (32).
X. Drys forsigtigt sandet ned i vandet i kolonnen. Bank forsigtigt med knoerne på kolonnens sider (ikke med hårdere/skarpe ting!) for at få sandet til at 'sætte sig' efterhånden som det drysses i.
XI. Når kolonnen er næste fuld af sand lægges kolonnens topstykke (21) på kolonnen (1). Sørg for, at gummipakningen er placeret rigtigt på kolonnerørets kant.
XII. Kontrastagsøjerne (26) kontrastagen (25) føres ind over de to kontrastutse (27), og momentlåsens (24) spids føres ind over midten af topstykket (21) hvorefter momentlåsen låses. Vær opmærksom på, at kontrastagsøjerne placeres rigtigt på kontrastutsene (se 26 og 27 på Fig. 2).
XIII. Før udløbsslangen (3) ned i reservoiret.

XIV. Tænd for pumpen (begynd med lav hastighed) og se at alt virker uden lækage[1].

Opstillingen er nu klar til eksperimenterne 1 (side 12) og 2 (side 15)!

[1] Topstykkets (21) tryk mod kolonnerøret er forudjusteret, så denne samling er tæt når momentlåsen (24) er lukket. Ved lækage efterses gummipakningen i topstykket, og kontramøtrikkerne (30) flyttes evt. en ganske lille smule (én omgang pr. justering) ned af kontrastagene (25), så samlingen bliver tættere.

Rengøring, tørring og nedpakning af kolonneopstillingen

Alt skal være tørt og rent

Men én undtagelser skal alt være tørt: indersiden af reservoir-dunken (31) må stadig have dråber på sig, og skal have sit låg forsvarligt skruet på. **Dunken skal være tømt forinden.**

Oprydning og rengøring efter endt arbejde med kolonneopstillingen omfatter:

1) Udskylning af blå farve fra alle dele og fra sandet, og udskylning af alt sand fra kolonnen.
2) Sandet opsamlet i en balje/på en bakke eller et fad, spredes ud og tørres.
3) Pumpehuset afmonteres og pumpeslangen tages ud. Pumpehuset monteres igen forsigtigt på pumpen.
4) Slanger afmonteres fra kolonnens sidestutse og indløbsstuts, samt fra stigrørsstutsene.
5) Stemplet trækkes ud af sprøjten.
6) Alle dele og slanger spredes og lægges til tørre et lunt og tørt sted, gerne på papir eller rist.

Efter rengøring og tørring af alle dele:

7) Den silikonefedtede del af pumpeslangen føres ind i en lille pose, og placeres i hulrummet under den peristatiske pumpe. Her lægges også posen med ekstra strips og silikonefedt.
8) Øvrige slanger lægges i hulrummet under kolonnen.
9) Kolonnen samles, men momentlåsen låses kun til en vinkel på 90 grader i forhold til kolonnens længderetning. Derved opbevares den ikke ved stor tryk. Kolonnen lægges i GeoCasen - kolonnen skal have momentlåsen til højre siden, og momentlåsen skal pege nedad i dertil udskåret kanal (med til at sikre 90 grader vinkel).
10) Sandet overføres til lynlåsposen. Luften presses ud af posen og posen lukkes grundigt og fuldstændigt. Posen lægges i kassen evt. i en ekstra pose.
11) Alle øvrige dele pakkes i kassen (se billede). Husk også USB-nøgle, manualer og øvelsesvejledninger, mv.
12) GeoCasen sendes til IGN, Øster Voldgade 10, Att: Søren Jessen, 1350 København K, Danmark.

Kontaktperson

Ansvarlig for GeoCasen **Grundvand og hydrogeologi**:
Søren Jessen, Lektor i Hydrologi og Hydrogeokemi
Øster Voldgade 10, 1350 København K
sj@ign.ku.dk / +45 5137 0693

Formelgrundlag

Darcys lov

Eksperimenterne i denne instruktion gør brug af forskellige former af Darcys lov for strømning i et porøst medie (f.eks. sand):

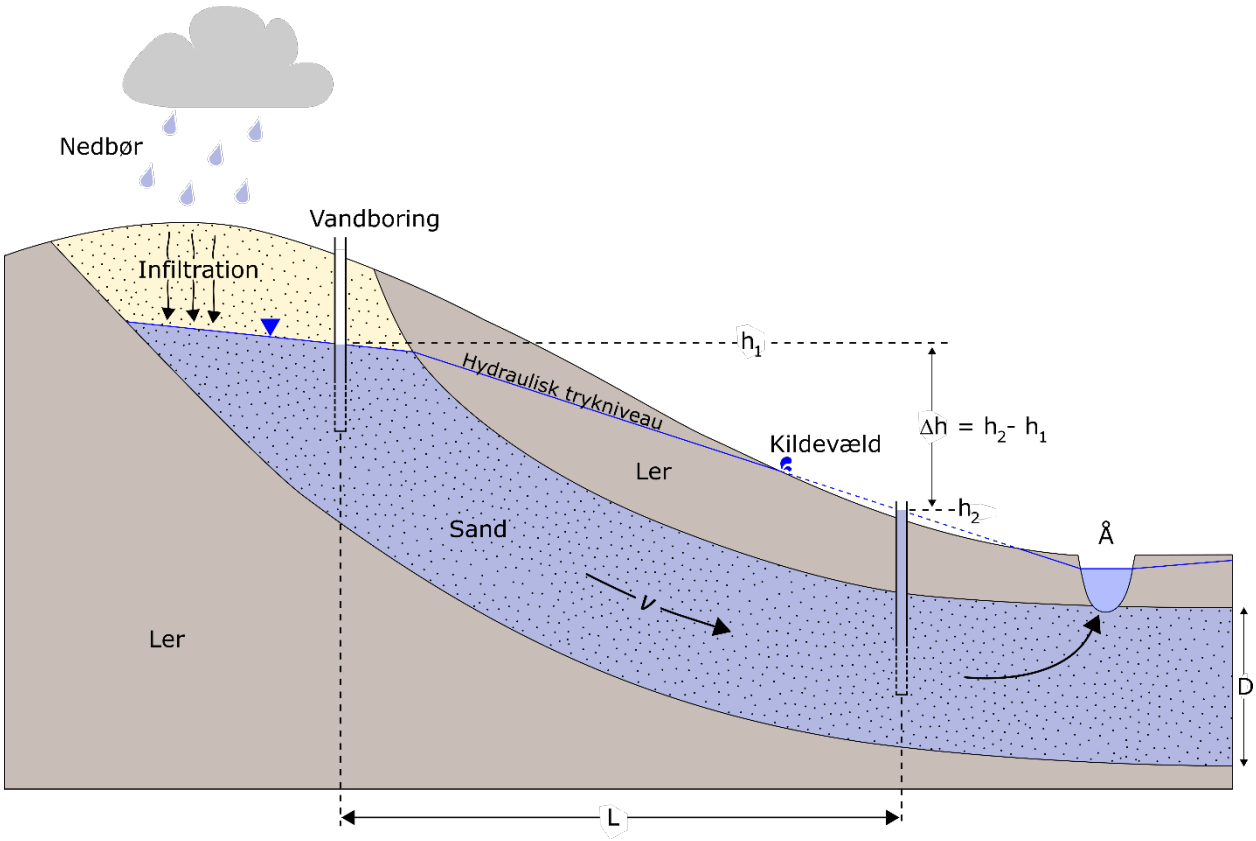
$$q = \frac{Q}{A} = -K\frac{\Delta h}{L} \qquad \text{F1}$$

hvor q er *darcyhastigheden* (m/s), Q er *vandfluxen* (m^3/s), A er det af Q gennemstrømmede *tværsnitsareal* (m^2) af det porøse medie og *vinkelret på strømningen*, Δh er forskellen i *hydraulisk trykniveau* (m) over afstanden L (m). K er den *hydrauliske ledningsevne* (m/s).

Darcys lov udtrykker, at darcyhastigheden q er ligefrem proportional med (dvs. lineært afhængig af) den *hydrauliske gradient* $\Delta h/L$. Proportionalitetskonstanten i Darcys lov er den hydrauliske ledningsevne K. Det negative fortegn på højresiden i F1 skyldes, at vandfluxen regnes som positiv i strømningens retning, i hvilken der nødvendigvis samtidig må være et fald i det hydrauliske trykniveau, således at Δh i sig selv er negativ.

Darcyhastigheden udtrykker et volumen (f.eks. m^3) vand, per areal (m^2) af et gennemstrømmet tværsnitsareal, per tidsenhed (s), hvilket giver en 'hastigheds'-enhed: $m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$ = m/s.

Darcys lov gælder ved laminar strømning. Ved turbulent strømning (som nås ved højere vandflux) vil darcyhastigheden ikke længere være ligefrem proportional med den hydrauliske gradient.



Figur 4 Grundvand dannes ved infiltration af nedbør gennem de umættede jordlag til grundvandspejlet. I grundvandsmagasinet strømmer grundvandet i henhold til Darcys lov, og det er forskelle i hydraulisk trykniveau som driver strømningen — også opad! Det hydrauliske trykniveau kan måles som vandstanden i boringer, der har filter i samme vandførende lag.

I et grundvandsmagasin der består af sand, strømmer grundvandet i porerummene mellem sandkornene, dvs. i sandets *porøsitet* (*n*). Derfor betegnes sand 'et porøst medie'.

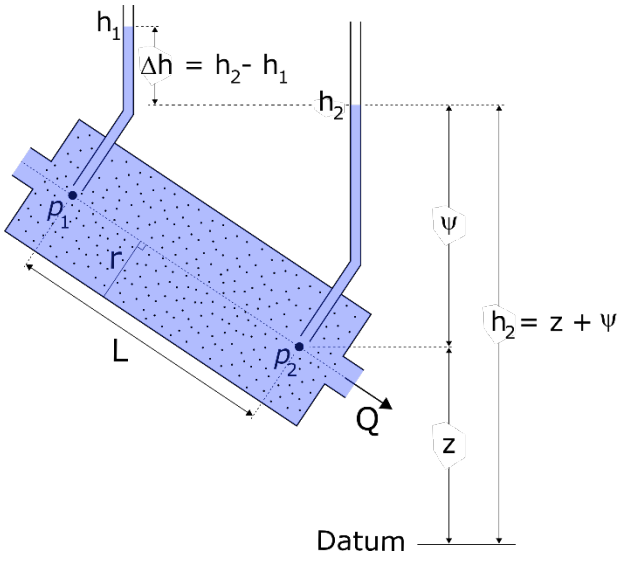
Under strømningen i et sandet grundvandsmagasin opstår friktion (dvs. gnidningsmodstand) mellem sandkornenes overflader og vandet, der strømmer i porerne mellem sandkornene. Friktionen kommer til udtryk som en modstand mod strømningen. Det er denne modstand som i Darcys lov optræder i form af den hydrauliske ledningsevne (*K*). Det er samtidig modstanden, der giver anledning til en helt konkret målbar forskel (Δh) i grundvandets hydrauliske trykniveau (*h*), hvilket vil sige en konkret forskel i højdebeliggenheden af vandspejlet i boringer (f.eks. i enheden meter over havniveau) som har filter (åbninger el. slidser) i samme grundvandsmagasin.

Figur 4 illustrerer et geologisk tværsnit gennem et sandet grundvandsmagasin. Det hydrauliske trykniveau i magasinet ses som vandpejlet i to boringer, h_1 og h_2. Det hydrauliske trykniveau falder fra venstre mod højre, og grundvandet strømmer derfor i dén retning.

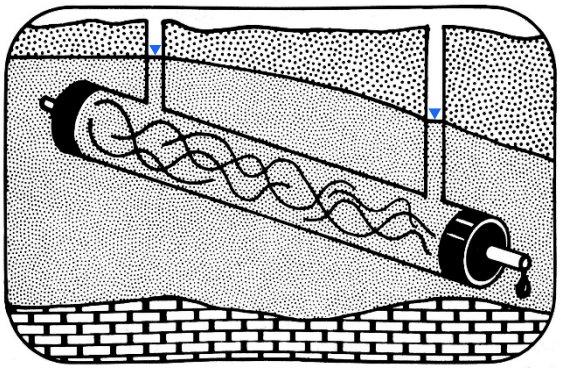
Figur 5 viser en laboratorieopstilling af en *kolonne*, dvs. et rør, som er fyldt med sand. Sandet kan være udtaget fra et virkeligt grundvandsmagasin som det i Figur 4. Opstillingen kan i så fald bruges til at bestemme sandets hydrauliske ledningsevne, hvilket kan danne grundlag for en senere beregning af darcyhastighed og vandflux i magasinet (f.eks. Anvendelsesøvelse 1). Kolonnen har *stigrør*, der udgår fra slanger på siden af kolonnen. Hvert stigrør måler det hydrauliske trykniveau dér, hvor slangen er fastgjort til kolonnen.

Figur 6 illustrerer sammenhængen mellem forsøgene beskrevet i denne vejledning og forholdene i et virkeligt grundvandsmagasin. I Figur 6 er indtegnet en kolonne i et grundvandsmagasin og kolonnens to stigrør svarer til boringer i grundvandsmagasinet.

I Box 1 findes en række 'mikroopgaver', som kan træne den generelle forståelse af hydraulisk trykniveau.



Figur 5 Tværsnit gennem kolonne og illustration af begrebet hydraulisk trykniveau. Sandet i kolonnen kan naturligvis være fra et virkeligt grundvandsmagasin.



Figur 6 Illustration af sammenhængen mellem et Darcy-kolonneforsøg og forholdene i et virkeligt grundvands-magasin (Forsideillustration fra Freeze & Cherry, 1979).

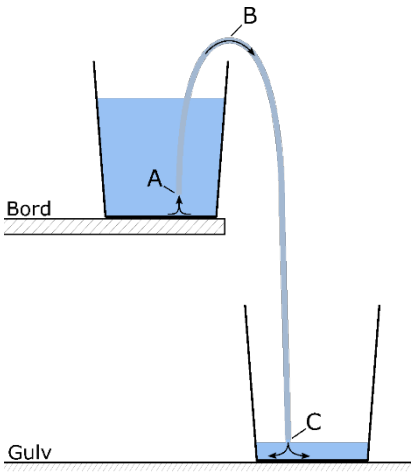
BOX 1 Mikroopgaver om hydraulisk trykniveau

1. **Al strømning, gennem rør såvel som gennem sand, medfører friktion (modstand mod strømning), som igen medfører forskelle i hydraulisk trykniveau.**
   a. Hvad ville Δh i Figur 5 indstille sig til, hvis man lukkede kolonnens ind- og udløb?
   b. Ville Δh i Figur 5 blive større eller mindre, hvis man øgede vandfluxen Q?
   c. Hvad ville der ske med størrelsen på Δh i Figur 5 hvis man vendte vandfluxen Q i modsat retning af den viste (uden at ændre størrelsen på Q)?
   d. Er der steder i Figur 4 hvor grundvandet løber opad?
   e. Hvor ville grundvandsspejlet i Figur 4 placere sig hvis der ikke var nogen grundvandsdannelse (ingen nedbør og ingen fordampning)? Antag evt. at vandstanden i åen forbliver konstant som vist.

2. **Tøm vand fra en spand på bordet til en spand på gulvet med en hævert (eller kig på Figur 7).**
   a. Hvor i hæverten løber vandet opad?
   b. Slangen er markeret med bogstaverne A, B og C. Ved hvilket bogstav er det hydrauliske tykniveau i slangen højest, middel og lavest?
   c. Overfør begreberne der definerer hydraulisk trykniveau fra Figur 5 til Figur 7, ved at tegne på Figur 7.
   d. Vi har intet 'stigrør' i slangen ved punkt B. Men vi kan regne den højest mulige værdi for trykhøjden ψ_B ud ved at benytte disse tal:

      z_A = 80 cm
      z_B = 115 cm
      z_C = 5 cm (gulvet er 'datum' = 0 cm)
      h_A = 20 cm (vandstand i spanden over A)
      ψ_C = 0 cm

      Hvad er den højeste mulige værdi for trykhøjden ψ_B?



Figur 7 En spand tømmes med en hævert.

Porøsitet og strømningshastighed

Når vand strømmer gennem sand, bevæger vandets sig naturligvis uden om, og ikke igennem, sandkornene. Vandet bevæger sig altså som nævnt ovenfor i porøsiteten (n), dvs. i porerne mellem sandkornene. Porøsiteten er defineret som porevolumen i forhold til totalt volumen:

$$n = \frac{Porevolumen}{Totalvolumen} \qquad \text{F2}$$

Porøsiteter (n) har derfor altid en værdi på mellem nul (ingen porøsitet, helt tæt bjergart) og 1 (ingen bjergart, kun hulrum). I praksis regner man for sandede grundvandmagasiner ofte med en porøsitet på 0,30. Til sammenligning kan det beregnes teoretisk, at helt runde kugler af ens størrelse kan pakkes så tæt som muligt til en porøsitet på ned til 0,26, eller de kan stables sindrigt så porøsiteten bliver op til 0,48.

Ved en given vandflux (Q) i et grundvandsmagasin vil *porevandshastigheden* (v) af vandet afhænge af porøsiteten:

$$v = \frac{Q}{An} = \frac{q}{n} \qquad \text{F3}$$

Porevandshastigheden er således vandfluxen Q divideret med den del af det porøse medies tværsnitsareal i hvilken strømningen reelt foregår: $A \times n$, hvor n i praksis altid er mindre end 1.

Porevandshastigheden, som den er defineret i F3, er en gennemsnitshastighed for den hastighedsvektor eller -komponent, der går i strømningens gennemsnitlige retning. Mange steder i magasinet vil porevandet bevæge sig meget langsommere (f.eks. nær sandkornenes overflader), og mange steder meget hurtigere (f.eks. rundt om sandkorn), end porevandshastigheden v i F3.

Eksperiment 1

Måling af hydraulisk ledningsevne eftervisning af Darcys lov

Laboratorieopstillingen bruges i dette eksperiment til at:

A) bestemme den hydrauliske ledningsevne (*K*) af sandet i kolonnen, og
B) eftervise Darcys lov (F1).

I eksperimentet tages udgangspunkt i den klargjorte opstilling (s. XX), som gør det muligt at bestemme værdien af *K* ved forskellige hydrauliske gradienter *I*. De forskellige gradienter fremkommer ved at variere vandfluxen *Q* (dvs. ved at variere pumpens hastighed).

Tabel 1 på side 14 kan benyttes til eksperimentet, idet tabellens hvide felter udfyldes med observerede værdier, mens de grå felter udregnes efterfølgende. Hver linje i tabellen gør det muligt at beregne én værdi af *K*. Benyt følgende fremgangsmåde:

1) Indledningsvist noteres kolonnerørets indre diameter til beregning af tværsnitsarealet *A*, samt afstanden *L* mellem de to stigrørsstutse til beregning af den hydrauliske gradient *I*.

2) Mens pumpen er slukket (hvor både vandfluxen *Q* og darcyhastigheden *q* er nul) noteres i første linje i Tabel 1 vandstandende i stigrørene h_1 og h_2 på linealen (se Figur 1 og tilhørende figurtekst). Disse bør have samme værdi. Hvis h_1 og h_2 ved $Q = q = 0$ er mere end få millimeter forskellige kan det skyldes luft i en af stigrørsslangerne. Hvis trykket er meget højt og så der løber vand oven ud af stigrørene kan det skyldes luft i udløbsslangen fra kolonnen til reservoiret. Luft bør fjernes før eksperimentet fortsættes.

Derefter gentages for hver linje i Tabel 1:

3) Pumpen tændes, hvis den ikke allerede er tændt, og justeres til en selvvalgt pumperate (mL/min). Begynd med en lav rate og benyt derefter gradvist højere pumperate.

4) Afvent stabilisering og notér vandstandende i stigrørene h_1 og h_2 ved aflæsning på linealen (se Figur 1 og tilhørende figurtekst).

5) Øg pumperaten og gentag derefter punkterne 3–5, indtil det ønskede antal linjer i tabellen er udfyldt (tilføj evt. flere linjer). Ofte passer det at øge pumperaten i trin på 25-50% mellem hver måling af gradienten. Optimalt skal man dække så stort et interval i Δh (begrænset at linealens længe). Det kan undervejs blive nødvendigt at flytte stigrørsholderen højere op ad stigrørsfoden.

Efterfølgende beregnes tværsnitsarealet $A = \pi r^2$ og derefter de grå felter, én tabelrække ad gangen:

6) Beregn vandfluxen *Q* i enheden m^3/s. Husk at 1 m^3 = 1.000 L = 1.000.000 mL.

7) Beregn darcyhastigheden *q* i enheden m/s, ved division af Q med A.

8) Beregn den hydrauliske trykniveauforskel Δh i enheden m. Bemærk negativt fortegn.

9) Beregn den hydrauliske gradient *I* (enhedsløs) ved division af Δh med *L*.

A) Beregning af hydraulisk ledningsevne:

10) Beregn den hydrauliske ledningsevne *K* i enheden m/s ved brug af Darcys lov (F1).

11) Udfør pkt. 6–10 for alle øvrige linjer i tabellen. Beregn derefter middelværdien af *K*-værdierne.

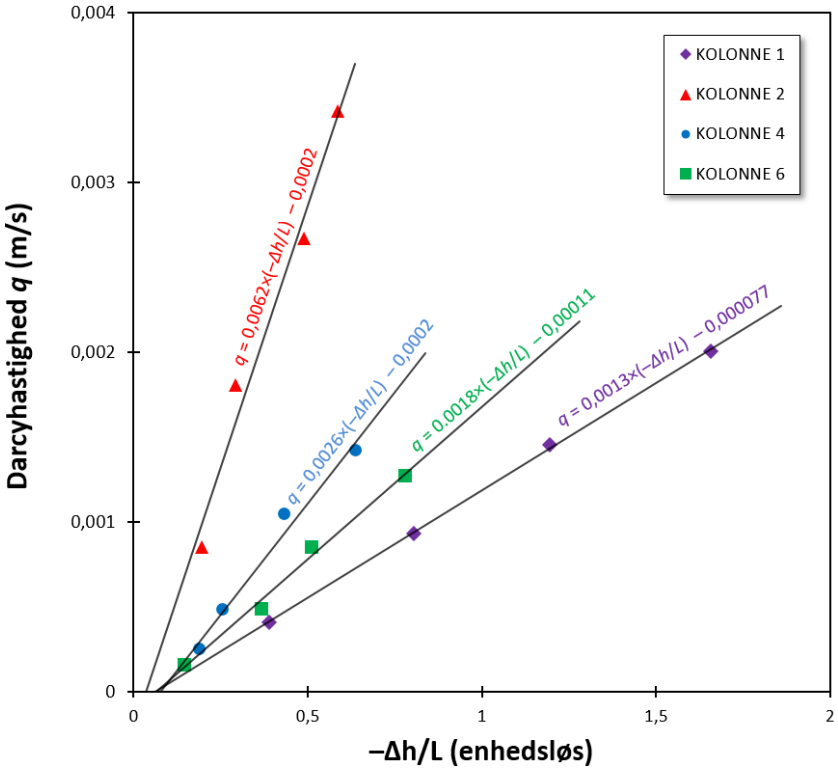
B) Eftervisning af Darcys lov:

12) Lav to grafer: Graf nr. 1 skal vise vandfluxen Q som funktion af forskellen i hydraulisk trykniveau, sidstnævnte med negativt fortegn (–*Δh*, som er positiv). Graf nr. 2 skal vise darcyhastigheden *q* som funktion af den hydrauliske gradient *I*, igen med negativt fortegn på sidstnævnte (dvs. –*I*).

13) Hvis punkterne i de to grafer danner en lige linje er der tale om et bevis for Darcys lov. Forklar hvorfor. (Tjek for indtastningsfejl hvis punkterne *ikke* danner en lige linje.)

14) Tegn én lige linje som gennem alle punkterne i graf nr. 2 (*q* vs. –*Δh/L*), så godt som det er muligt. Tving linjen gennem (0,0). Find hældningen på linjen og sammenlign med de målte værdier af *K* og deres middelværdi (punkt 10 og 11).

Figur 8 viser resultater fra fire kolonner fyldt med sand med forskellig *K*-værdi. Figuren illustrerer benyttelsen af lineær regression til beregning af den hydrauliske ledningsevne *K* for hver af de fire sandprøver. Det ses, at punktet (*q*, –*Δh/L*) = (0,0) *ikke* er taget med i beregningen/eksperimentet, men det kunne (måske burde) punktet have været.



Figur 8 Eftervisning af Darcys lov, og udledning af K-værdi ved lineær regression. Figuren viser resultater fra fire kolonner fyldt med forskellige sandprøver, hvilket resulterer i fire K-værdier. Resultaterne er fra forsøg udført at gymnasieelever fra Rosborg Gymnasium i Vejle.

Tabel 1 Skema til måling af hydraulisk ledningsevne (*K*) og samtidig eftervisning af Darcys lov.

Vandflux, *Q*		**Darcyhastighed, *q***	**Gradient, *I***				**Hydraulisk ledningsevne, *K***
Pumperate (mL/min)	Q (m^3/s)	$q = Q/A$ (m/s)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	$\Delta h = h_2 - h_1$ (m)	$I = \Delta h/L$ (-)	Darcys lov K (m/s)
0	0	0					
						Middelværdi:	

Indre diameter af kolonnerør: _____ m

Tværsnitsareal *A*: _____ m^2

Afstand *L* mellem stigrørsudtag h_1 og h_2: _____ m

Eksperiment 2

Måling af porevandshastighed og porøsitet

I dette eksperiment tilsættes farvestof til vandet for at gøre det muligt at 'se' vandet strømme gennem kolonnen.

Det vil kunne erkendes, at vandet i *gennemsnit* strømmer med porevandshastigheden, der som tidligere beskrevet er en middelhastighed. Samtidig vil det kunne ses, at noget vand strømmer hurtigere end porevandshastigheden, hvilket kommer til udtryk ved at nogle farvepartikler når tidligt frem gennem kolonnen. Andet vand strømmer langsommere, hvilket ses ved at nogle farvepartikler er forsinkede i forhold til porevandshastigheden. Når en smule farvestof tilsættes som en puls til indløbsslangen vil denne puls derfor gradvist blive længere og længere, efterhånden som den transporteres gennem kolonnen. Et eksempel ses i Figur 9.

I eksperimentet skal man aflæse vandets porevandhastighed, dvs. hvor langt farvestoffet i *gennemsnit* er transporteres gennem kolonnen som funktion af tiden. Man skal derfor tilsigte at aflæse *midten* af farvepulsen. Tabel 2 kan benyttes til eksperimentet, som udføres således:

1) Pumpen sættes på en middel pumperate, i forhold til Eksperiment 1, og slukkes (hvis den ikke allerede er det).
2) I en sprøjte opsamles ca. 1-2 mL blå farve (Brilliant Blue). Farven er ikke giftig, men brug gerne handsker, og sørg for ikke at spilde på tøj eller andet. Hav evt. papirservietter klar.
3) Sprøjten forbindes til én-vejsventilen på indløbsslangen, ventilen åbnes og farven overføres forsigtigt.
4) Ventilen lukkes, sprøjten afmonteres, og pumpen tændes.
5) Et stopur tændes.
6) Pulsen af farve vil nu transporteres med vandet gennem kolonnen (se Figur 9). Notér til højre i Tabel 2 tiderne (minutter og sekunder) ved hvilke midten af farvepulsen vurderes at være ud for mærkerne 0, 5, 10, 15 og 20 cm. Tag evt. billeder undervejs – billedernes tidsstempel kan også bruges efterfølgende; det er sådan Figur 10 er fremstillet.
7) Flyt herefter evt. udløbsslangen til en anden beholder end reservoiret for at undergå at recirkulere farven. Dette blot for at lette rengøringsarbejdet.

Tabel 2 Skema til hjælp ved bestemmelse af porevandshastighed og porøsitet. Flere værdier kan evt. overføres fra Tabel 1.

Vandflux, *Q*		**Darcyhastighed, *q***
Pumperate (mL/min)	Q = Δt/Vol. (m^3/s)	$q = Q/A$ (m/s)

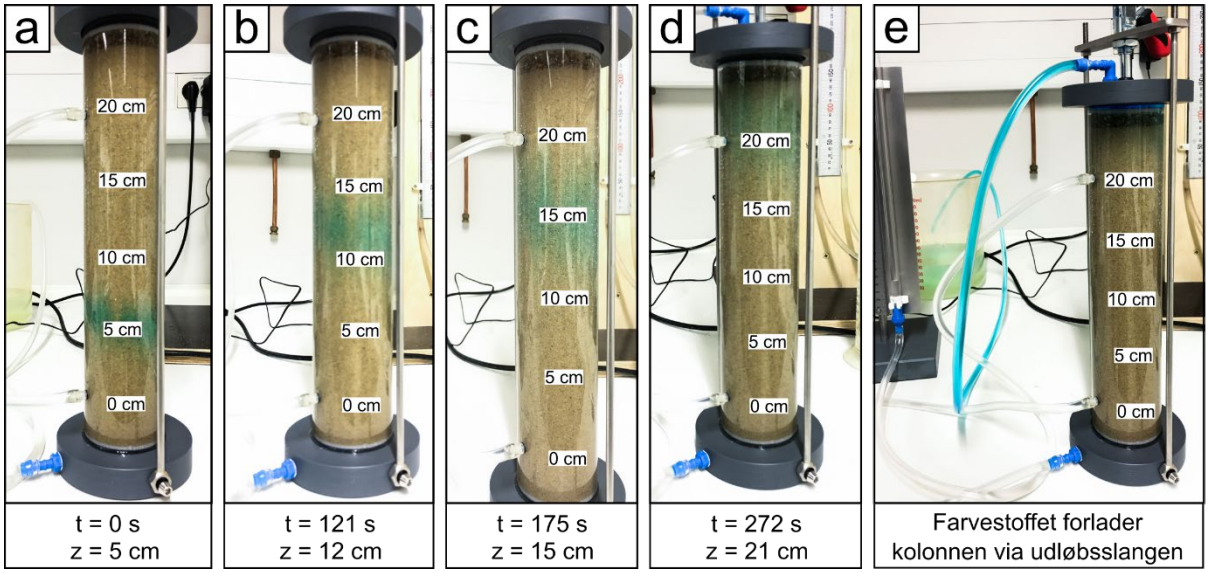
Indre diameter af kolonnerør: _____ m

Tværsnitsareal A: _____ m^2

Afstand L mellem stigrørsudtag h_1 og h_2: _____ m

Position af farvepuls

Position z (cm)	Tid t (min:s)	Tid s (s)
5		
10		
15		
20		
25		



Figur 9 Kolonne fotograferet under passage af farvepuls med vandstrømmen i kolonnen, nedefra og op. Farvepulsen ses ved 5 cm-mærket i (a) og 'strækkes ud' under transporten videre op gennem kolonnen. Billederne er brugt til at notere tider *t* (taget fra billernes tidsstempler) og afstande *z* for midten af pulsen.

Bestemmelse af porevandhastighed:

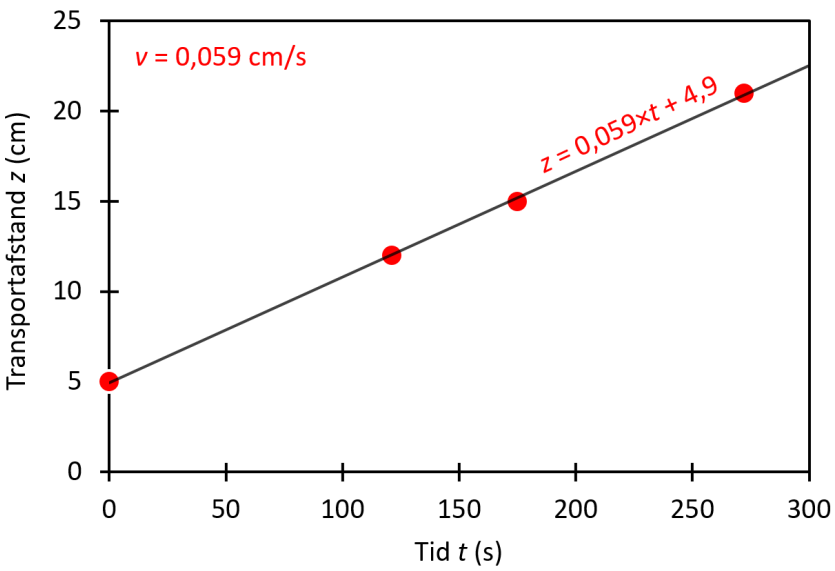
8) Beregn tiden *t* i sekunder.

9) Lav en graf, der viser farvepulsens position *z* som funktion af tiden *t* i enheden sekunder (se f.eks. Figur 10). Bemærk: Det betyder ikke noget, hvornår stopuret blev sat i gang. (Kontrollér at enhedsomregningen af tiden til sekunder er korrekt hvis punkterne *ikke* falder rimeligt på en lige linje.)

10) Brug grafens hældning til at finde porevandhastigheden.

Bestemmelse af porøsiteten:

11) Benyt formel F3 til at beregne porøsiteten *n*.



Figur 10 Porevandshastighed beregnet fra tider og afstande aflæst fra billerne i Figur 9. Videre beregning af porøsitet kræver at darcyhastigheden er kendt. Darcyhastigheden er den middelhastighed vandet ville have, hvis porøsiteten var 1, hvilket svarer til at kolonnen ikke indeholdt sand.

Anvendelsesøvelse 1

Beregninger af en forurenings hastighed

Som eksempel på anvendelsen af Darcys lov, er Figur 4 vist igen herunder (som Figur 11) i en lidt modificeret udgave. I Figur 11 må man forestille sig, at der på et tidspunkt er sket en forurening, som nu transporteres nedstrøms med grundvandet. Boring 2 bruges som privat drikkevandsboring af en enkelt familie, og åen rummer en biodiversitet, som skal beskyttes. En række spørgsmål melder sig typisk:

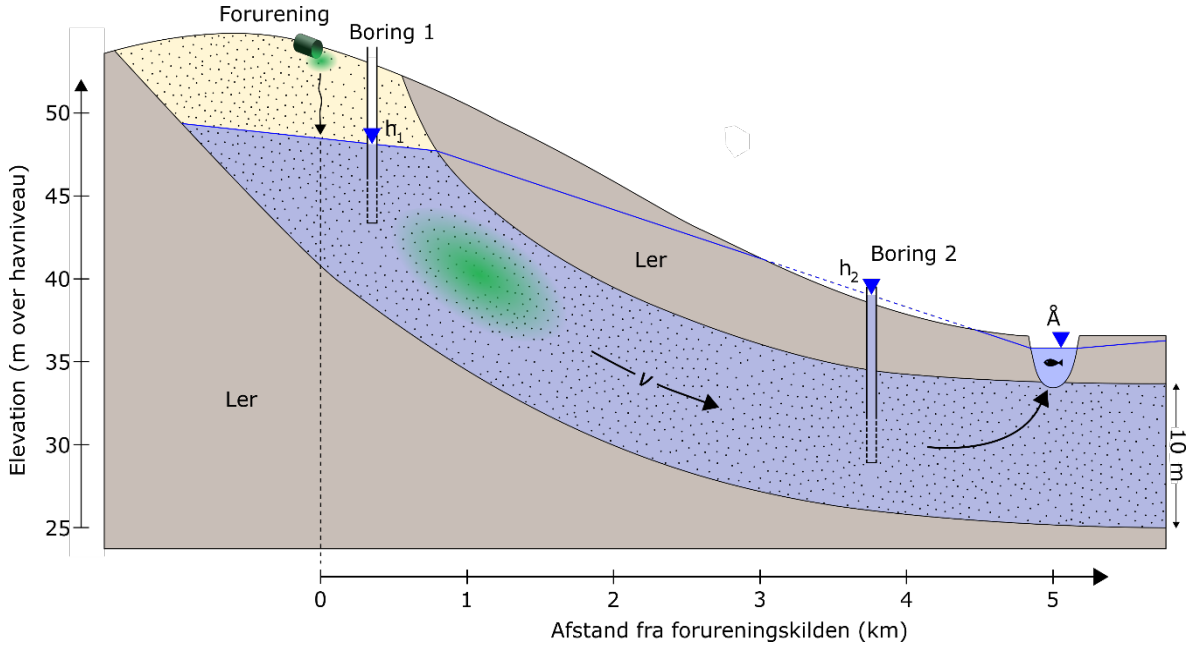
- Hvor hurtigt transporteres forureningen i grundvandet?
- Hvornår vil den ramme drikkevandsboringen? Hvornår vil åen blive ramt?
- Hvis vi opgiver at indvinde drikkevand fra Boring 2, og i stedet vil pumpe fra Boring 2 for at afværge at forureningen når åen, hvor meget vand skal vi så pumpe fra boringen?

Alle spørgsmålene kan besvares med hjælp fra Darcys lov.

Forureningens transporthastighed:

1) Brug Darcys lov til at beregne darcyhastigheden mellem Boring 1 og 2. Aflæs hydrauliske trykniveauer og afstanden mellem boringerne i Figur 11. Benyt en hydraulisk ledningsevne $K = 1\times10^{-3}$ m/s, eller brug en K-værdi bestemt ved egen udførelse af Eksperiment 1.

2) Antag en porøsitet på 0,30 og brug formel F3 til at beregne porevandshastigheden v. Omregn porevandshastigheden til enheden m/år.



Figur 11 Transport af forurening fra en punktkilde og mod en drikkvandsboring (Boring 2) og et vandløb. Længdeaksen under figuren viser de horisontale afstande fra forureningskilden. Det antages, at forureningen fandt sted på én gang over kort tid, og at kilden efterfølgende ikke længere er/har været aktiv. Magasinets tykkelse antages alle steder at være lig D.

Hvornår rammer forureningen drikkevandsboringen (Boring 2) og åen?

3) Aflæs på Figur 11 i hvilken afstand forureningen befinder sig netop nu. Brug porevandshastigheden fra forrige opgave til at beregne i hvilket årstal, forureningen vil nå frem til hhv. Boring 2 og til åen.

Hvornår skete forureningen?

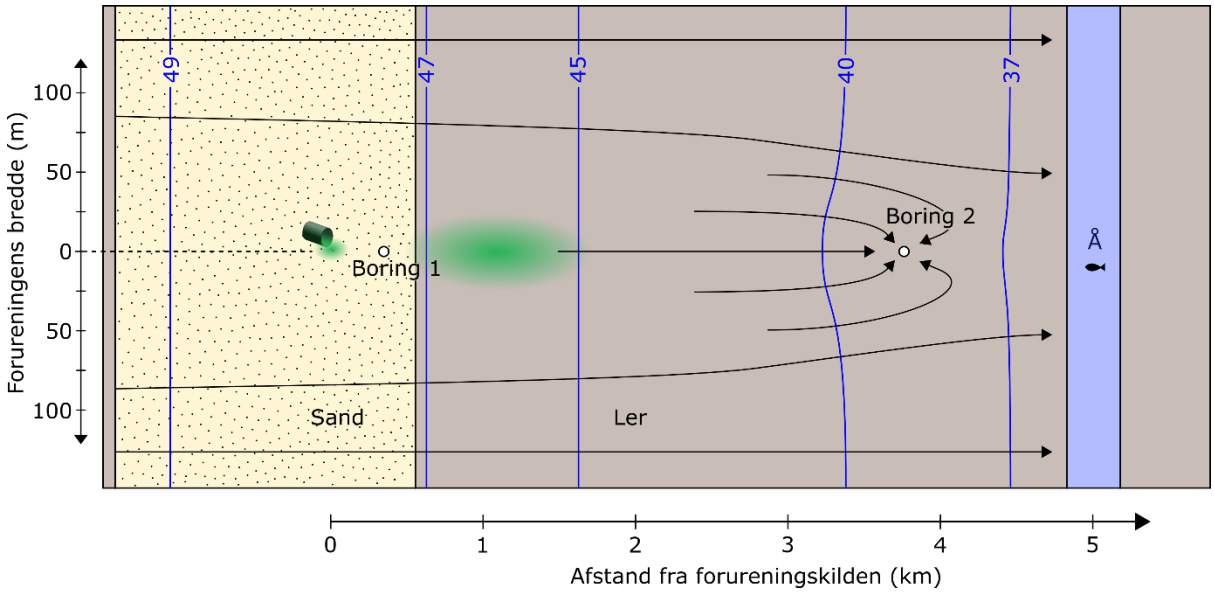
4) Tidspunktet for hvornår en forurening har fundet sted er ikke altid kendt. Regn baglæns, og find ud af, hvornår forureningen på terrænet over magasinet skete. Antag fem års transporttid fra terræn ned gennem den umættede zone og til grundvandsspejlet.

Hvor meget vand skal oppumpes pr. år (Q_P) for at afværge at forureningen når åen?

Vi tænker os i denne opgave, at Boring 2 i Figur 11 opgives som drikkevandsboring og i stedet bruges til *afværgeboring*. Oppumpning i afværgeboringen, med pumperaten Q_P, skal forhindre, at forureningen passerer boringen og dermed forhindre, at forureningen når åen.

Oftest kræver en god dimensionering af en afværgepumpning at der udvikles en tredimensionel computer-model for grundvandsstrømningen i området. En overslagsberegning kan imidlertid give et rimeligt retvisende indtryk af, hvor meget vand, der vil skulle pumpes. Til overslagsberegningen må vi gøre en række antagelser, som beskrives herunder.

Bemærk først, at Figur 11 er todimensional. Vi antager at åen, landskabet, den geologi, og de grundvandsforhold der er vist på figuren, strækker sig uendeligt 'ind i' og 'ud af' figurens todimensionelle plan. Også forureningen vist i Figur 11 må naturligvis strække sig over en vis afstand ind og ud af figuren. Situationen i Figur 11 er vist, set oppefra, i Figur 12, hvoraf det fremgår, at forureningen vil have en *bredde*. Lige under punktkilden var denne bredde måske en enkelt eller få



Figur 12 Forureningen vist i Figur 11, her set oppe fra. Pilene viser antagede strømningsbaner i grundvandsmagasinet og de blå linjer er antagede isopotentialelinier, begge under afværge-oppumpning fra Boring 2. Blå tal angiver det hydrauliske trykniveau langs en given isopotentialelinje.

meter, men under den første kilometers transport har forureningen spredt sig ud i alle tre dimensioner: omtrent 1 km i længderetningen af transporten, ca. 5 m vertikalt (se Figur 11), og omtrent 2 × 20 m = 40 m i bredden (set oppefra, Figur 12). Vi antager at forureningen vil have opnået en bredde på 2 × 50 m = 100 m, og have spredt sig vertikalt til hele magasinets dybde D = 10 m, når forureningen efter yderligere flere kilometers transport når til Boring 2.

Figur 12 viser desuden isopotentialelinjer (blå) under afværgepumpningen fra Boring 2. Det antages, at afværgepumpningen kun påvirker strømningsmønsteret ganske lokalt omkring Boring 2, herunder at pumperaten Q_P ikke forårsager, at der trækkes vand fra åen mod Boring 2.

På baggrund af disse antagelser kan gøres følgende betragtning: Den pumperate Q_P som skal anvendes må svare omtrent til den vandflux Q som løber gennem magasinet i hele dettes dybde D og i 100 m bredde. Opgaven lyder derfor:

5) Beregn vandfluxen Q (i enheden m^3/år) som gennemstrømmer et tværsnitsareal A på 10 m × 100 m ved Boring 2 i grundvandsmagasinet i Figur 11. Benyt Darcys lov og darcyhastigheden q beregnet i opg. 1 ovenfor, ved beregningen af forureningens transporthastighed.

Afværgepumpning kan forhindre en forurening i at nå en drikkevandsboring eller en sø, å, havet eller et vådområde. Men afværgepumpning har også omkostninger: Meget vand skal pumpes væk. Og da der i sagens natur er tale om *forurenet* vand, kan det være dyrt at rense inden det skal føres tilbage til vandkredsløbet. Desuden risikerer afværgepumpningen at sænke vandspejlet i skadelig grad i f.eks. nærliggende søer eller vandløb.

Tre idéer til andre anvendelser, SRP-opgaver, og fagkombinationer

Idé nr. 1

Beregn usikkerheden på den hydrauliske ledningsevne *K* og/eller forureningens transporttid

Emneord: Statistik, normalfordeling, histogram, usikkerhed, risikovurdering
Varighed af eksperimentelt arbejde: 1-3 timer

Efter udfyldning af Tabel 1 kan der beregnes statistisk usikkerhed (standardafvigelse) på den hydrauliske ledningsevne. Standardafvigelsen kan bruges videre til at beregne første og sidste sandsynlige ankomsttid for forureningen i Anvendelsesøvelse 1. Dette ville være del af en risikovurdering i en virkelig forureningssag.

Uafhængige *K*-værdier ved en fastholdt vandflux *Q* kan bestemmes ved at flytte enten reservoiret eller stigrørsholderen m. liniealen op eller ned i niveau mellem målingerne. Alternativt kan *Q* varieres. Dette gør, at tallene der skal aflæses på linealen er nye, og dermed ukendte.

Der kan også bestemmes f.eks. otte-tolv *K*-værdier med flere *ens* eller *forskellige* sand-prøver. For hver sandprøve kan derefter tegnes histogram, mv. Hvis sandprøverne er *ens* er histogrammerne så også ens? Eller introducerer *metoden* (f.eks. 'pakningen' af kolonnen) en signifikant usikkerhed?

Idé nr. 2

Reduktion af nitrat med organisk kulstof eller pyrit

Emneord: Uorganisk kemi, vandmiljø, samfund, kulstof- og kvælstofkredsløb, næringsstofbelastning
Varighed af eksperimentelt arbejde: 1-2 timer

Som led i emnearbejde omkring grundvand, hvor f.eks. Eksperiment 1 og 2, og Anvendelsesøvelse 1 er udført, kan man gå videre med at arbejde med næringsstoftransport. En opgave kunne behandle:

- Kvælstofkredsløbet og global fødevareproduktion/Jordens befolkningstal (Industriel Haber-Bosch vs. naturlig fiksering).
- Transporttiden fra mark til vandløb med udgangspunkt i Figur 11, hvor nedsivningen af nitrat finder sted i hele 'sandvinduet', og transporttiden videre til havmiljøet (antag strømningshastighed i vandløb).
- Reaktioner, der kan omsætte nitrat (*denitrifikation*):

Organisk kulstof som elektrondonor:

$$5CH_2O + 4NO_3^- \leftrightarrow 2N_2 + 5HCO_3^- + H^+ + 2H_2O$$

Svovl i pyrit (FeS2) som elektrondonor:

$$5FeS_2 + 14NO_3^- + 4H^+ \leftrightarrow 7N_2 + 5Fe^{2+} + 10SO_4^{2-} + 2H_2O$$

Disse to kemiske reaktioner forgår i danske ådale (især med organisk kulstof) hvor grundvandet lige før åen ofte møder sedimenter med højt indhold af organisk materiale, og i danske grundvandsmagasiner hvor pyrit eller org. kulstof er tilstede. Denitrifikation med pyrit danner sulfat (SO_4) som kan transporteres med grundvandet over store afstande.

Et eksempel på denitrifikation med pyrit og transport af sulfat er beskrevet i artiklerne Postma et al. (1991) og Jessen et al. (2017), samt posteren Jessen et al. (2017); alle tre findes i PDF-format på USB-nøglen i GeoCasen.

Idé nr. 3

Hydrologi: Vand- og stofbalance i et opland

Emneord: Vandforsyning, vandmiljø, forurening, kemi
Varighed af eksperimentelt arbejde: 1-2 timer

Som led i emnearbejde omkring grundvand, hvor f.eks. Eksperiment 1 og 2, og Anvendelsesøvelse 1 er udført, kan man gå videre med at arbejde med vandbalancen for et opland (Figur 13). En opgave kunne behandle:

- Elementer i en vandbalance: Nedbør (*N*), grundvandsdannelse (*R*), fordampning (*E*), transpiration (*T*), vandløbsafstrømning (*Q*), oppumpning (*P*), og ændring i opmagasinering (*ΔS*), hvor *E* og *T* ofte samles i én term, evapotranspiration (*ET*):

  $$\Delta S = N - ET - Q - P \quad \text{og} \quad R = N - ET \quad \text{og} \quad \Delta S = R - Q - P$$

  Opmagasineringen falder i relativt tørre år (negativ *ΔS*) og stiger i våde år (positiv *ΔS*), og antages ofte lig nul over længere tid. Al nedbør i Figur 13, der falder inden for vandløbsnetværkets opland, og som ikke evapotranspirérer, eller fjernes fra oplandet via oppumpning, eller fører til øget vandstand i grundvand og overfladevand, bliver til vandløbsafstrømning.

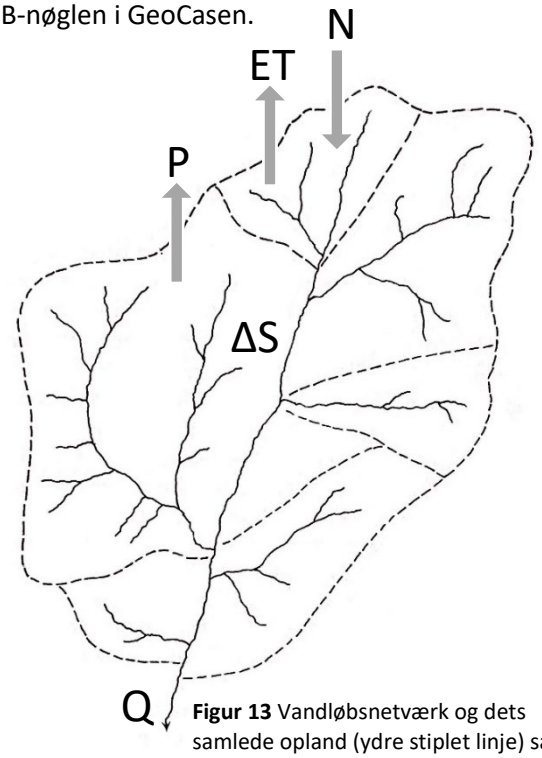
- Grundvands gennemsnitlige alder, hvor gns. opholdstid = grundvandsdannelse / samlet porevolumen af grundvandsmagasin.

- Grundvandsdannelsen og vandløbsafstrømningen i et vådere klima: antag 5%, 10%, 15% og 20% stigning i *N* og uændret *ET*. Vil risikoen for oversvømmelser langs vandløbene stige? Se evt. Karlsson et al. (2012) som findes i PDF-format på USB-nøglen i GeoCasen.

- Hvad bliver koncentrationen af nitrat-N (mg NO_3-N/L) i vandløbet ved udløbet af oplandet, hvis grundvandsdannelsen i hele oplandet er 500 mm/år, og oplandets areal er 2500 ha, hvoraf 2000 ha er landbrugsjord med et kvælstofoverskud på 75 kg N/ha/år som eneste kilde til nitrat, og hvis *ingen* denitrifikation finder sted?

- Sammenlign med virkelige koncentrationer af kvælstof i vandløb som kan findes på arealinfo.dk. Se Box 2 og Figur 14, som viser Grønholt Å ved Horsens som eksempel.

- Grønholdt Å har en gennemsnitlig vand-føring på 2,8 m3/s. Hvor mange ton N førte åen til Horsens fjord i 1990 og 30 år senere, i 2020?



Figur 13 Vandløbsnetværk og dets samlede opland (ydre stiplet linje) samt indre deloplande (indre stiplede linjer).

BOX 2 Tidsserie af kvælstof i vandløb

Fremsøgning af data fra miljoedata.miljoeportal.dk og vandportalen.dk

Som eksempel på brugen af miljoedata.miljoeportal.dk vises herunder, hvordan man henter en **tidsserie for kvælstof** i **Bygholm Å** ca. 5 km vest for Horsens, hvor åen krydser Grønhøjvej (Lat. 55°52'21" N, Long. 9°45'16" Ø).

Sådan hentes CSV-fil med data for kvælstof som total-N fra ovennævnte station:

a. Gå til Miljødata på Danmarks Miljøportal på web-adressen *miljoedata.miljoeportal.dk*.
b. Zoom på kortet så du kun ser Bygholm Å løbe under Grønhøjvej og lidt af omgivelserne.
c. Under *Kemi parameter* vælg *253 – Nitrogen, total N* og klik på *Søg i dette område* øverst til venstre på kortudsnittet.
d. Stationen ses nu som en blå prik. Klik på stationen.
e. Teksten *280000001 – BYGHOLM Å,…* vises over prikken. Klik på pilen til højre for teksten.
f. I bunden af skærmen finder man nu en liste med én fil. (For at se listen med filen skal man evt. klikke på en lille pil nederst til højre for kortudsnittet.)
g. Klik på download-ikonet, og du modtager data.

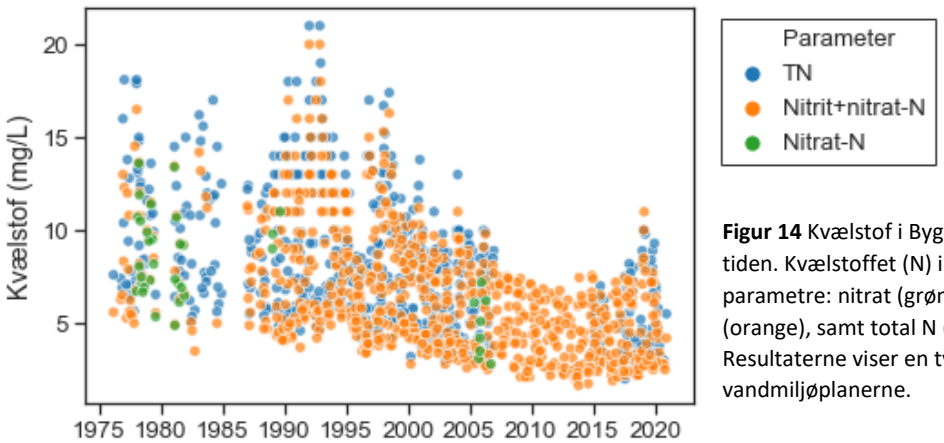
En CSV-fil fra netop denne station og som indeholde flere kamiparametre er tilgængelig på USB-nøglen i GeoCasen.

Sådan hentes **oplandsareal** og en **tidsserie med vandføring** for Bygholm Å (samme station som ovenfor):

h. Gå til vandportalen.dk, og find stationen ved at zoome ind på kortet.
i. Klik på stationen, og tryk på *Mere info*. Noter *Oplandsareal* (som er 154.19 km²).
j. Gå tilbage til kortet, og klik i stedet under *Vis plot* på *Vandføring, Døgnmiddel (DMP)*.
k. Download tidsserien som kolonnefil fra siden der åbner.

Afbildning af kvælstof-koncentration *vs.* tid

l. Lav en graf, der viser koncentrationen af total kvælstof *vs.* tid. Figur 14 viser et eksempel, hvor andre kvælstof-parametre også er medtaget: total N (TN; blå), nitrat-N (grøn) og summen af nitrit- og nitrat-N (orange).



Figur 14 Kvælstof i Bygholm Å som funktion af tiden. Kvælstoffet (N) indgår i forskellige parametre: nitrat (grøn), summen af nitrit og nitrat (orange), samt total N (blå; inkl. organisk N). Resultaterne viser en tydelig virkning af vandmiljøplanerne.