Fluidmekanikk

Kopieringsgrunnlag for tillegg til Rom Stoff Tid Forkurs kapittel 6: Fysikk i væsker og gasser

Av
Arne Auen Grimenes
Per Jerstad
Bjørn Sletbak

Fluidstrøm

Fluider er en fellesbetegnelse for stoff som ikke har en bestemt form og som kan strømme, altså væsker og gasser. Vi har hittil studert fluider i ro. Nå skal vi gå videre med fluider som beveger seg, det vi kaller *fluidstrøm*. Ofte brukes også betegnelsen *væskestrøm*, selv om det kan være en gass.

Eksempler på væskestrøm er vind, vann i elv, olje i rør og blod i årer. For å beskrive de viktigste trekkene ved væskestrøm skal vi bruke et såkalt *idealfluid*. Et slikt fluid er uten indre friksjonskrefter, det vi kaller for *ikke-viskøst*. Både luft og er vann er tilnærmet ikke-viskøse. Mer tyktflytende fluider kalles *viskøse*, for eksempel olje og blod.

Viskøs / ikke-viskøs

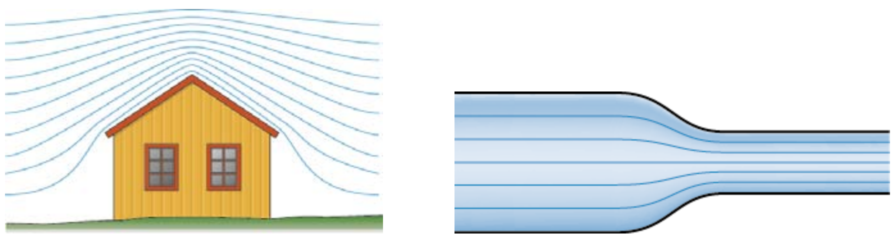
Inkompressibel

Et idealfluid er også *inkompressibelt*, det vil si at tettheten i fluidet er konstant. Væsker er tilnærmet inkompressible. Gasser er kompressible, men dersom trykket i gassen varierer lite kan vi ofte regne den som inkompressibel. Når vind treffer en loddrett vegg i stormkast på over 100 km/h reduseres luftas tetthet med mindre enn én prosent.

Når vi videre bruker begrepet væske mener vi et idealfluid.

Strømlinjer og stasjonær strøm

Når vi skal forestille oss hvordan væskepartiklene beveger seg mens de strømmer, tegner vi linjer som illustrerer bevegelsen til væskepartiklene. Slike linjer kaller vi *strømlinjer*. En strømlinje viser banen til en tenkt væskepartikkel slik at fartsretningen til væskepartikkelen alltid er tangent til strømlinjen.



Figuren til venstre viser strømlinjer for luft som blåser over et hus. Figuren til høyre viser strømlinjer for vann i et rør.

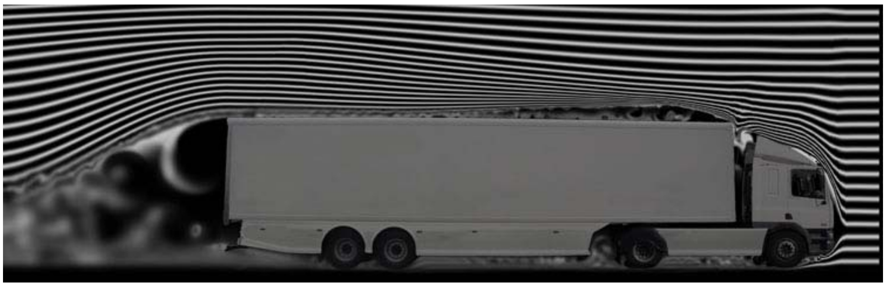
Selv om strømlinjene bare viser retningen og ikke farten til væskepartiklene, må farten være forskjellig på forskjellige steder i strømmen. Det forklarer vi slik: Farten til lufta må være høyere like over taket på huset (siden all lufta som treffer husveggen jo skal forbi der) enn den er høyt oppe over taket. I røret har vannet lavere fart i den tykke delen enn i den tynne delen, selv om vannmengden som transporteres i røret er konstant over tid. Vannet må presses fortere gjennom den tynne delen for at samme vannmengde skal kunne passere begge steder.

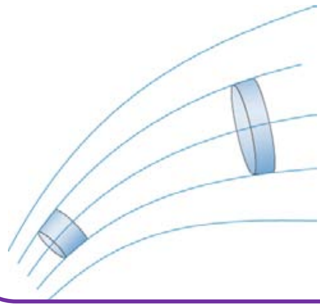
Vi merker oss at *strømlinjene ligger tettere der væsken har høyere fart og mer spredt der væsken har lavere fart*.

Hvis farten i ethvert punkt i en væske som strømmer i et rør hele tida er konstant (men ikke lik fra punkt til punkt), sier vi at strømmen er *stasjonær*. Stasjonær strøm kalles ofte for *laminær strøm*. I stasjonær strøm vil aldri strømlinjer krysse hverandre.

Stasjonær strøm

Dersom væskemengden gjennom et rør er konstant over tid, men farten i et punkt likevel *ikke er konstant*, kalles strømningen *turbulent*. Turbulens oppstår når strømningsfarten er stor eller når strømninger passerer legemer med skarpe kanter. Bildet viser turbulensvirvlene som oppstår bak et vogntog.





Figuren viser en liter vann på to forskjellige steder i en elv der elven utvider seg og blir dypere.
Hvilken av literene har størst fart?
Hvorfor er literen til høyre flatere enn literen til venstre?

Volumstrøm og massestrøm

Når vi skal måle hvor mye væske som strømmer i et rør har vi to muligheter:

Massestrøm

Massestrømmen q_m er definert som massen m av væsken som passerer et tverrsnitt i røret per tid t.

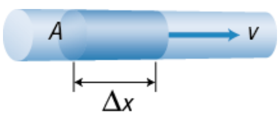
$$q_m = \frac{m}{t}$$

Volumstrøm

Volumstrømmen q_V er definert som volumet V av væsken som passerer et tverrsnitt i røret per tid t.

$$q_V = \frac{V}{t}$$

Enheten for massestrøm er kg/s og enheten for volumstrøm er m^3/s.



Figuren i margen viser væske med farten v som passerer et tverrsnitt med areal A. I løpet av tida $t = \Delta t$ har væsken beveget seg strekningen Δx. Vi ser at det sylinderformede volumet som har passert tverrsnittet er $V = A\Delta x$. Volumstrømmen blir da

$$q_V = \frac{V}{t}$$

$$= \frac{A\Delta x}{\Delta t}$$

Siden væskefarten $v = \Delta x / \Delta t$ kan vi skrive

Volumstrømlikning

$$q_V = Av$$

Denne likningen brukes ofte når vi løser oppgaver med volumstrømmer.

EKSEMPEL

En ventilasjonskanal skal levere 4,0 m^3 luft per time til et arbeidsrom. For at det ikke skal føles trekkfullt når luften kommer ut i rommet må strømningsfarten ikke overstige 5,0 cm/s. Hvor stor er da volumstrømmen?
Hvilken diameter må kanalen ha der den munner ut i kontoret?

Løsning

Volumstrømmen er

$$q_V = \frac{V}{t}$$

$$= \frac{4{,}0\ \mathrm{m}^3}{60 \cdot 60\ \mathrm{s}} = 1{,}111 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s} = \underline{1{,}1\ \mathrm{l/s}}$$

Tverrsnittet til kanalen der den munner ut er der $A = \pi r^2$. Vi bruker likningen for volumstrøm og får

$$q_V = Av$$

$$q_V = \pi r^2 v$$

$$r = \sqrt{\frac{q_V}{\pi v}}$$

$$r = \sqrt{\frac{1{,}111 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}}{\pi \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m}}} = 8{,}410 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m}$$

Svar: Diameteren blir det dobbelte, altså 17 cm.

Kontinuitetslikningen

Når en væskestrøm går gjennom et rør uten forgreininger må like mye væske passere ethvert tverrsnitt i røret per tid. Væske kan jo ikke bli borte eller oppstå inne i røret. Denne bevaringsloven kaller vi kontinuitetslikningen.

Kontinuitetslikningen

For en stasjonær strøm med inkompressibel væske vil væskestrømmen være den samme for ethvert tverrsnitt.

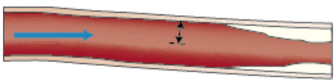
$q_m = q_{m0}$ eller $q_V = q_{V0}$

Kontinuitetslikningen for volumstrøm

Som regel bruker vi kontinuitetslikningen for volumstrøm. Siden $q_V = Av$ skriver vi derfor ofte kontinuitetslikningen på formen:

$$A_2 v_2 = A_1 v_1$$

EKSEMPEL



En blodåre transporterer 45 ml/min. Blodårens indre diameter er normalt 4,2 mm.

a) Beregn farten til blodet i åren.

b) En åreforkalkning har lenger fremme i blodåren halvvert diameteren.
Hvor stor er farten til blodet her?

Løsning

a) Vi bruker likningen for volumstrøm og får

$$q = Av \qquad \text{der } A = \pi r^2$$

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

$$= \frac{q}{\pi r^2}$$

$$= \frac{45 \cdot \dfrac{10^{-6}\,\text{m}^3}{60\text{ s}}}{\pi\left(2{,}1 \cdot 10^{-3}\text{ m}\right)^2} = 0{,}05413 \text{ m/s} = \underline{5{,}4 \text{ cm/s}}$$

b) Når blodårens diameter halveres, halveres også radien. Vi bruker kontinuitetslikningen og får

$$A_1 v_1 = Av \qquad \text{der } A_1 = \pi r_1^{\,2} \text{ og } A = \pi r^2$$

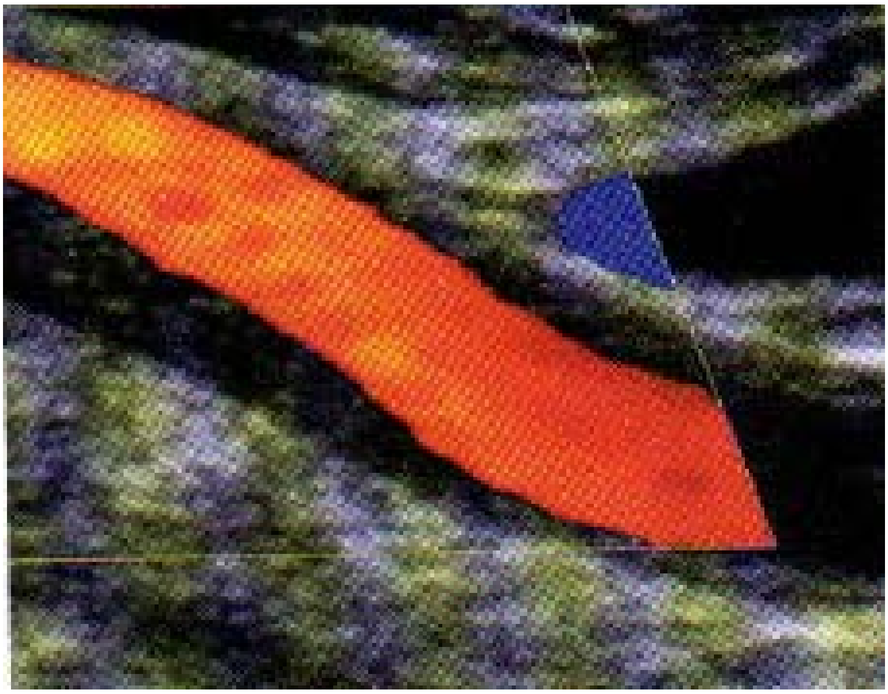
$$\pi r_1^{\,2}\, v_1 = \pi r^2 v$$

$$v_1 = \frac{\pi r^2}{\pi r_1^2} v$$

$$= \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 v$$

$$= \left(\frac{2{,}1 \cdot 10^{-3}\,\text{m}}{\frac{1}{2} \cdot 2{,}1 \cdot 10^{-3}\,\text{m}} \right)^2 \cdot 0{,}05413\ \text{m/s} = \underline{22\ \text{cm/s}}$$

Vi ser av utregningen at farten til blodet firedobles når radien halveres.



Bildet som viser blodstrømmen i en blodåre er tatt med doppler-ultralyd-teknikk. Fargeskalaen går fra rød til gul med stigende fart. Vi ser at farten er høyere ved innsnevringen til venstre i bildet en til høyre der blodåren har normal diameter.

Bernoullis likning

Væskemekanikkens mest sentrale likning er nok den utgaven av arbeid–energi-setningen som kalles Bernoullis likning. Denne naturloven som beskriver sammenhengen mellom trykket i og farten til en væske som strømmer i et rør, ble oppdaget og modellert matematisk av sveitseren Daniel Bernoulli allerede omkring 1738. Energibegrepet var den gangen ikke oppfunnet, så Bernoulli baserte sin modell på empiriske forsøk. Vi formulerer vanligvis Bernoullis likning som en bevaringslov:

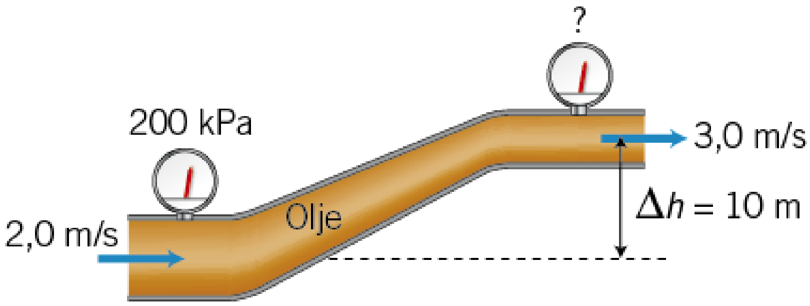
Bernoullis likning

For en stasjonær strøm i rør der en væske med trykket p og tettheten ρ strømmer med farten v har vi at

$$p_2 + \rho g h_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 = p_1 + \rho g h_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2$$

Vi drar umiddelbart kjensel på leddene som representerer kinetisk energi og potensiell energi – men her er masse byttet ut med tetthet. Trykket representerer arbeidet som trykkreftene utfører på væsken som strømmer.

EKSEMPEL



Figuren viser olje med tettheten 820 kg/m^3 som strømmer i en rørledning.
Hva viser den øverste trykkmåleren?

Løsning
Vi forutsetter at vi har stasjonær strøm og bruker Bernoullis likning

$$p + \rho g h + \tfrac{1}{2}\rho v^2 = p_0 + \rho g h_0 + \tfrac{1}{2}\rho v_0^2$$

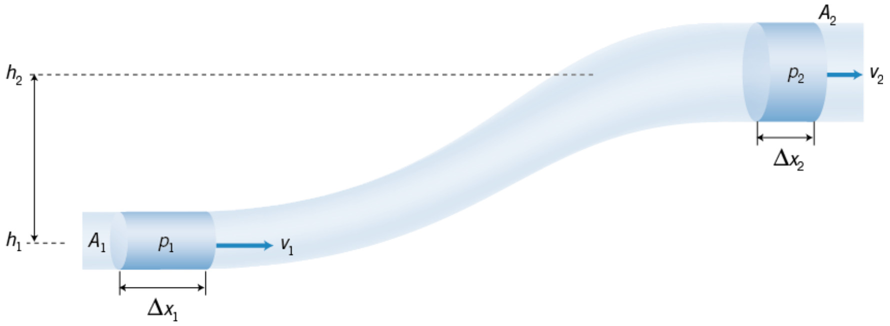
$$p = p_0 + \rho g h_0 - \rho g h + \tfrac{1}{2}\rho v_0^2 - \tfrac{1}{2}\rho v^2$$

$$p = p_0 + \rho g\left(h_0 - h\right) + \tfrac{1}{2}\rho\left(v_0^2 - v^2\right) \qquad \text{der } h_0 - h = -\Delta h$$

$$p = p_0 - \rho g \Delta h + \tfrac{1}{2}\rho\left(v_0^2 - v^2\right)$$

$$p = 200 \cdot 10^3 \text{ Pa} - 820 \text{ kg/m}^3 \cdot 9{,}81 \text{ N/m} \cdot 10 \text{ m}$$
$$+ \tfrac{1}{2}\, 820 \text{ kg/m}^3 \cdot ((3{,}0 \text{ m/s})^2 - (2{,}0 \text{ m/s})^2) = \underline{122 \text{ kPa}}$$

Før vi går videre med flere eksempler på anvendelser av Bernoullis likning skal vi utlede loven fra arbeid–energi-setningen. La oss undersøke hva som skjer med et lite væskevolum *V* med masse *m* som beveger seg mot høyre i et rør med varierende diameter slik figuren viser, med varierende høyde over bakken og med varierende fart.

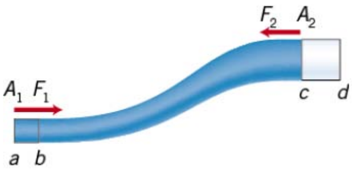


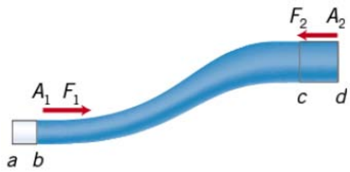
Når volumet, som er blåfarget på figuren, starter i posisjon 1 i røret har det kinetisk energi $E_{k1} = ½mv_1^2$. Litt seinere har trykkreftene i væsken i røret skjøvet dette væskevolmet til posisjon 2 der det har kinetisk energi $E_{k2} = ½mv_2^2$. Endringen i kinetisk energi er altså

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

Kreftene som virker på væskevolumet er tyngdekraften og trykkreftene fra vannet på begge sider av volumet. Tyngdekraften er konstant (siden volumet ikke endrer masse) mens volumet forflytter seg. Dermed kan vi beregne arbeidet som tyngdekraften gjør når væsken forflytter seg fra posisjon 1 til posisjon 2. Det kan vises at dette arbeidet er lik arbeidet tyngdekraften gjør når væsken løftes loddrett opp fra høyden h_1 til høyden h_2. Arbeidet er negativt siden kraft og forflytning har motsatt retning:

$$W_G = -Gh = -mg(h_2 - h_1) = mgh_1 - mgh_2$$





For å finne arbeidet som trykkreftene utfører når de skyver væsken fra posisjon 1 til posisjon 2 lager vi en ny figur av røret ovenfor. Det markerte væskevolumet øverst består av væsken i posisjon 1 og av væsken i mellom de to posisjonene. Under ser vi hvor denne væsken befinner seg etter at trykkreftene har skjøvet væskeflaten A_1 fra a til b. Vi ser at på samme tid er væskeflaten A_2 skjøvet fra c til d. Nettoeffekten av denne væskeforflytningen er altså akkurat den samme som om vi hadde flyttet volumet som var i posisjon 1 opp til posisjon 2. Dermed kan vi finne arbeidet trykkreftene gjør ved å beregne nettoarbeidet for denne forskyvningen av vannet. Trykkraften $F_1 = p_1A_1$ f utfører arbeidet

$$W_1 = F_1\Delta x_1 = p_1A_1\Delta x_1$$

Trykkraften $F_2 = p_2A_2$ utfører også arbeid, men det er negativt siden kraft og forflytning har motsatt retning:

$$W_2 = -F_2\Delta x_2 = -p_2A_2\Delta x_2$$

Siden $V_1 = V_2 = V$ har vi at

$$A_1\Delta x_1 = V_1 = V \text{ og } A_2\Delta x_2 = V_2 = V$$

Da får vi for nettoarbeidet til trykkreftene:

$$W_p = W_1 + W_2 = p_1A_1\Delta x_1 - p_2A_2\Delta x_2 = p_1V - p_2V$$

Da kan vi sette opp arbeid–energi-setningen:

$$W_{\Sigma F} = \Delta E_k$$

$$W_p + W_G = \Delta E_k$$

$$p_1V - p_2V + mgh_1 - mgh_2 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

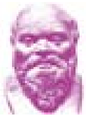
$$p_1V + mgh_1 + \tfrac{1}{2}mv_1^2 = p_2V + mgh_2 + \tfrac{1}{2}mv_2^2$$

Vi forenkler uttrykket ved å dividere på volumet V. Siden $\rho = m/V$ får vi da

$$\frac{p_1 V}{V} + \frac{mgh_1}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv_1^2}{V} = \frac{p_2 V}{V} + \frac{mgh_2}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv_2^2}{V}$$

$$p_1 + \rho g h_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

som er Bernoullis likning.



Hva har Bernoullis likning å gjøre med likningen for hydrostatisk trykk på side 153?

Anvendelser av Bernoullis likning

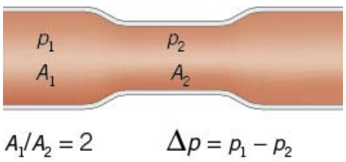
Vi skal se på en noen eksempler som illustrerer forskjellige måter å anvende Bernoullis likning på.

EKSEMPEL

I en rørledning i en bensinpumpe er det plassert en innsnevring slik at rørets tverrsnitt i innsnevringen A_2 er halvparten av den ordinære tverrsnittet $A_1 = 3{,}0\ \text{cm}^2$. To trykksensorer måler trykkforskjellen $\Delta p = 12$ kPa i bensinen mellom trykket før innsnevringen og trykket inne i innsnevringen. Tettheten for bensinen er 720 kg/m^3.

a) Hvor stor fart har bensinen i røret før (og etter) innsnevringen?

b) Hvor stor er volumstrømmen i røret?



Løsning

a) Vi setter opp Bernoullis likning for strømningen i røret:

$$p_2 + \rho g h_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 = p_1 + \rho g h_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2$$

Siden røret har samme høyde over bakken ($h_1 = h_2$) kan vi forenkle likningen slik:

$$p_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 = p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2$$

$$\tfrac{1}{2}\rho v_2^2 - \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = \Delta p \qquad \text{der } \Delta p = p_1 - p_2 \qquad (1)$$

Siden væsken er inkompressibel kan vi også sette opp kontinuitetslikningen:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \qquad (2)$$

Vi setter inn (2) for v_2 i likning (1) og får

$$\tfrac{1}{2}\rho\left(\frac{A_1}{A_2}v_1\right)^2 - \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = \Delta p$$

$$\tfrac{1}{2}\rho v_1^2\left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2-1\right]=\Delta p$$

$$v_1=\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho\left(\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2-1\right)}}$$

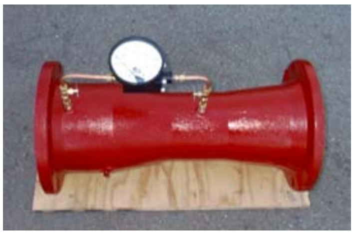
$$v_1=\sqrt{\frac{2\cdot 12\cdot 10^3\ \text{Pa}}{720\ \text{kg/m}^3\left(2^2-1\right)}}=3{,}333\ \text{m/s}=\underline{3{,}3\ \text{m/s}}$$

b) Vi bruker likningen for volumstrøm og får

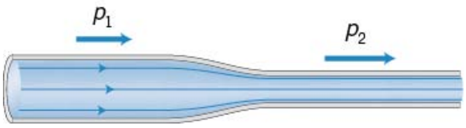
$$q_V = A_1 v_1$$

$$q_V = 3{,}0\ \text{cm}^2\cdot 3{,}333\ \text{m/s} = \underline{0{,}10\ \text{l/s}}$$

Eksempelet ovenfor viser at man kan måle hvor mye væske som strømmer i et rør, bare en har slik innsnevring i røret og trykkforskjellen mellom røret og innsnevringen er kjent. En slik innsnevring kalles en *venturidyse* eller et *venturirør*. Venturiprinsippet er i utstrakt bruk for å måle væske- og gasstrømmer. Bildene nedenfor viser to venturi-stømningsmålere.



Bernoullieffekten



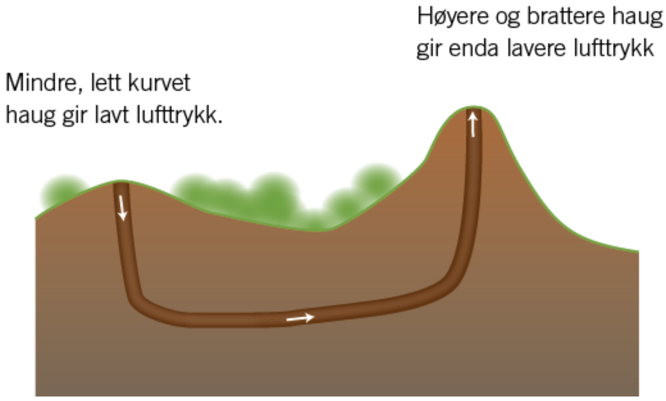
Figuren viser et rør med stasjonær strømlinjestrøm der rørets diameter er avtagende. I følge kontinuitetslikningen må da farten til væsken øke mot høyre. Siden røret har samme høyde over bakken ($h = h_0$) kan vi forenkle Bernoullis likning slik:

$$p+\tfrac{1}{2}\rho v^2 = p_0+\tfrac{1}{2}\rho v_0^2$$

$$p+\tfrac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstant}$$

Vi ser av uttrykket at væsken må ha lavt trykk i områder med stor fart og høyt trykk i områder med liten fart. Dette gjelder for alle typer strømlinjestrøm og kalles *Bernoullieffekten*.

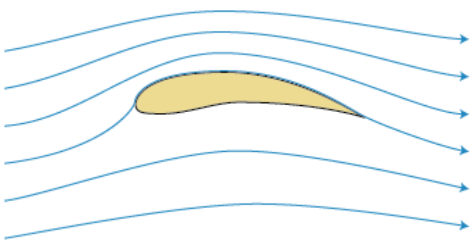
Bernoullieffekten er velkjent i naturen så vel som i teknologien. Et godt eksempel er naturlig ventilasjon som brukes både av præriehunder og arkitekter.



Hiet til præriehunden har to innganger, én som er munner ut i en lav rund haug av jord, og én som munner ut i en litt høyere og spissere jordhaug. Det viser seg at vi kan bruke Bernoullieffekten for å forklare hvorfor denne konstruksjonen fører til utmerket ventilasjon i hiet. Vinden som blåser over prærien må ha høyere fart for å passere over den høye og spisse haugen enn over den lave og avrundede haugen. Det betyr at lufttrykket like over hi-inngangen i den høyre haugen på figuren haugen er litt lavere enn trykket like over inngangen i venstre haugen. Denne trykkforskjellen mellom de to åpningene fører til at luft trekkes gjennom hiet fra venstre inngang til høyre inngang.

Arkitekter bruker samme prinsipp når de konstruerer naturlige ventilasjonsløsninger i bygg. Ved å skjerme et luftinntak for vind og eksponere den andre åpningen for vinden oppstår trykkforskjeller som skifter ut luften.

Flyvingeløft



En flyvinge er utformet slik at luften som passerer vingen har en lengre veg å gå på oversiden av vingen enn på undersiden av vingen. Dermed får luften større fart på oversiden enn på undersiden. I følge Bernoulliprinsippet blir da trykket på oversiden lavere enn trykket på undersiden. Det betyr at det blir en netto løftekraft oppover på vingen på grunn av trykkforskjellen.

OPPGAVER

Fluidstrøm

6.32
Forklar hva vi mener med begrepene
a) ikke-viskøs væske
b) idealfluid

6.33
a) Definer massestrøm og volumstrøm.
b) Forklar hva det betyr at en væske er inkompressibel.
c) Forklar med ord hva kontinuitets-likningen sier om massestrøm og om volumstrøm.

6.34
En kompressor komprimerer 300 m^3 luft ved normaltrykk per time. Tettheten til luften er 1,28 kg/m^3.
Hvor stor er massestrømmen målt i kg per døgn?

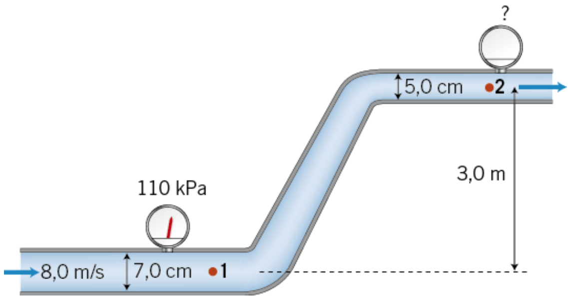
6.35
Volumstrømmen i en oksygenslange er 14 liter per minutt. Tettheten til oksygen er 1,4 kg/m^3.
a) Hvor stor er massestrømmen?
b) Hvor stor er farten til oksygenet som kommer ut av slangemunningen når åpningen har et tverrsnittsareal på 0,80 cm^2?

6.36

Vann strømmer med farten 3,0 m/s ut av en vannkran der tverrsnittsarealet av kranåpningen er 2,0 cm^2. Like før vannstrålen treffer vasken under kranen har vannstrålen et tverrsnittsareal på 0,50 cm^2.
a) Hvor stor er farten til vannet da?
b) Hvor stor er volumstrømmen fra kranen?

6.37
I aorta, som har en indre radius på 9,0 mm strømmer blod med en fart på 30 cm/s. Blodet føres ut og fordeles etter hvert i kapilærårene hvor det har en typisk fart på 1,0 mm/s.
Hvor stort må det samlede tverrsnittet av alle kapilærårene være?
Forutsett ikke-viskøs strøm.

Bernoullis likning

6.38


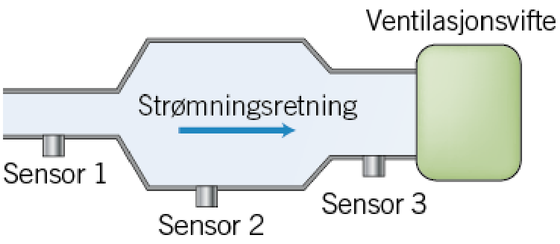
Vann strømmer i et rør. Bruk opplysningene i figuren for å
a) beregne væskefarten i punkt 2.
b) beregne trykket som det øverste manometeret viser.

6.39
En oljerørledning kan transportere 240 000 m^3 råolje per døgn. Rørledningen har normalt en diameter på 60 cm og trykk er 180 kPa. Tettheten til oljen er 800 kg/m^3.
a) Hvor stort blir trykket i en innsnevring i rørledningen der diameteren er redusert til 40 cm?

Rørledningen passerer et høydedrag som er 12 m høyere enn omgivelsene.
b) Hvor stort er trykket i rørledningen på toppen av høydedraget?
Tettheten til oljen er 800 kg/m^3.

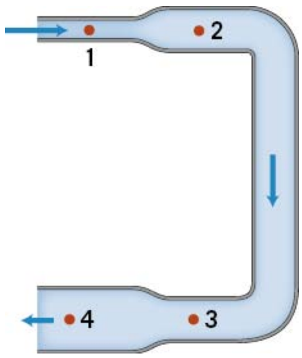
6.40
Vann flyter i en horisontal rørledning med farten 4,0 m/s og et trykk på 200 kPa.
a) Hva blir væskefarten i røret dersom diameteren avtar til det halve?
b) Og hvor stort blir trykket i væsken da?

6.41



For å studere trykkforholdene i et ventilasjonsanlegg har vi koplet inn trykksensorer på tre steder i en kanal. Ranger sensoren i rekkefølge etter høyest viste trykk.

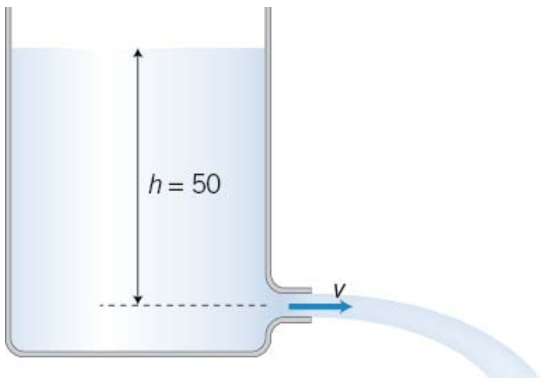
6.42



En væske strømmer i et rør med varierende diameter slik at væskens fart og trykket i væsken varierer.

a) Ranger i stigende rekkefølge væskefartene $v_1, \dots v_4$ for punktene 1–4.
b) Ranger i stigende rekkefølge væsketrykket $p_1, \dots p_4$ for punktene 1–4.

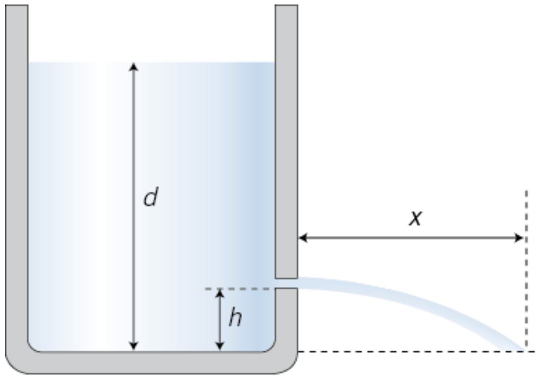
6.43



Beregn farten til vannet som renner ut fra åpningen i karet når $h = 50$ cm.

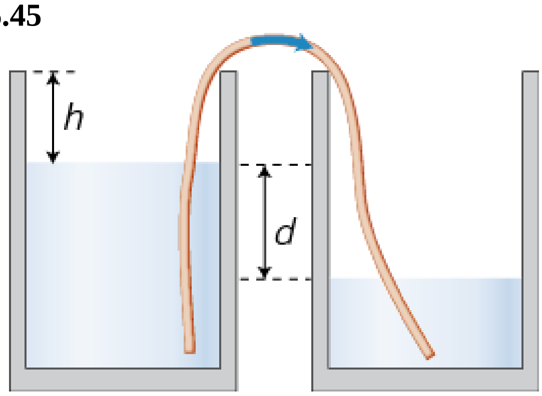
Du kan anta at farten til vannet øverst i karet er ubetydelig (tilnærmet null) i forhold til farten til vannet som strømmer ut av hullet. Du kan også anta at trykket i væsken vannet er lik lufttrykket der væske er i direkte kontakt med luft.

6.44



a) Finn farten v til væsken som strømmer ut av hullet i beholderen uttrykt ved d og h.
b) Væsken som renner ut av åpningen i beholderen beveger seg som et legeme i fritt fall (skrått kast) og treffer bordet i avstanden x fra beholderen.
   Finn x uttrykt ved d og h.

6.45



a) Bestem farten til vannet i heverten når $d = 60$ cm.
b) Bestem trykket i vannet i hevertens øverste del når $h = 50$ cm.
   Tips: Du kan anta at trykket inne i slangen der den passerer vannflaten i det høyre karet er like stort som lufttrykket utenfor.

6.46
Forklar hvorfor et tak kan "løftes" av huset dersom det blåser sterk vind.