



Poul Nielsen

Roms vandforsyning

- en fortælling om dengang
for længe siden

Fysikforlaget 2004

Roms vandforsyning – en fortælling om dengang for længe siden

(C) 2004 Fysikforlaget og Poul Nielsen

Omslagsfoto og illustrationer: Poul Nielsen

Layout: Niels Elbrønd Hansen

Copyright: Materialet kan frit kopieres til undervisningsbrug

Tak for velvillig gennemlæsning af henholdsvis det historiske og det fysiske til Gitte Kjærup og Ole Sørensen.

Specielt en tak til Niels Elbrønd Hansen for ufortrødent arbejde med opsætningen.

Brugere af **Roms vandforsyning** er velkomne til at henvende sig med kommentarer til materialet, påpegning af fejl m.m.

– Det vil blive modtaget med tak.

Odense, 2004

Poul Nielsen

Indholdsfortegnelse

<i>Lidt om romerne og vand</i>	3
<i>Romernes bade (thermer)</i>	5
<i>Byen Roms vandforsyning</i>	7
<i>Vandets vej til Rom</i>	10
<i>Om forsøg med vand</i>	12
<i>Vandstrøm i kanaler</i>	14
<i>Vandstrøm gennem et rør</i>	16
<i>Forsøg med vand</i>	20
<i>Opgaver</i>	29
<i>Opgaver til studietur</i>	37
<i>Litteraturliste</i>	40

Lidt om romerne og vand

Vand kommer da fra vandhaner ! - i dag i hvert fald. Hanerne er så godt nok koblet til et ledningsnet og vandværker. Disse henter for det meste vandet fra undergrunden eller fra overfladevand. Vandet renses, iltes og sendes så ud.

For romerne var det anderledes.

Teknikken var nok enklere, men blev udviklet så det, man byggede var godt gedigent ingeniørarbejde gennemført ud fra nøje overvejelser.

Byen Roms beliggenhed

Et kort over Italien viser lidt om Roms beliggenhed. Byen ligger på et lavland omgivet af højland på de tre sider og så Middelhavet 20 til 25 km væk.

Kortet viser også et lavland præget af højlandets afvanding. Klarest ses i dag Tiberens delta. Tiberens løb er blevet reguleret og landet drænet. Kort sagt er landet blevet kultiveret.

Selve storbyen har i dag bredt sig ud over en stor del af lavlandet.

Byens oprindelse

Sagnene fortæller flere historier om Roms grundlæggelse. Bl.a. om et nyfødt tvillingepar Romulus og Remus, der sættes ud i bjergene, opfostres af en ulvinde og derfor bliver så stærke at de siden er i stand til at grundlægge byen Rom.

Byen fik navn efter den længstlevende, Romulus, som ifølge sagnet blev Roms første konge. Romernes

egen tradition fra oldtiden siger, at Rom blev grundlagt som by den 21. april 753 f.Kr. Den dag dannede en række familier byen Roma. Denne voksede fra at være en lille flække på syv høje, tæt ved et sted hvor Tiberen let kunne krydses, til storbyen af idag. Byen blev langsomt moderby og administrativt center for hundredvis af andre byer.

Bortset fra det sidste står byens oprindelse noget uklart for historikere og arkæologer. Alderen anslås dog mindst til at være 2500 år.

Romerne og vand

Romerne havde dengang vandet "lige udenfor døren". De må have kendt en del til vand og være blevet fortrolige med det.

De opbygger en flåde og har havneby i Ostia ude ved kysten. Efterhånden som romerriget vokser op og får magt, bliver vandvejen et bindende led for riget, samt den billigste transportvej. Efter 146 f.Kr. hvor Kartago falder hedder Middelhavet således "mare nostrum" - vores hav.

Stillestående vand og dets eventuelle farlighed som drikkevand var kendt. Sumpfeber eller malaria lærer romerne først at kende langt senere i 300-tallet e.kr.. Disse sygdomme gør Rom næsten ubeboelig. På godt 100 år sænkes indbyggertallet fra 1,5 million til 30 - 40.000. Dette er en af grundene til byen Roms fald og at kejseren flytter hovedstaden til Istanbul (Konstantinopel) i ca 300 tallet.

Oversvømmelser pga. Tiberen har også været kendt. Forfængelighed, udsyn og tanken på forsvar har næppe været den eneste grund til at byen blev bygget på høje.

Romerne kendte også værdien af rindende, rent og klart vand. Det var vigtigt for dem. Luft og vand var det livgivende.

Byer og vandforsyning

I Rom er vandforsyningen vokset op med byen. Vel først vand fra Tiberen, vandløb, brønde o.lign. og senere mere teknisk gennemførte løsninger.

Byer opstod i oldtiden som et resultat af, at landbruget producerede nok fødevarer til at gøre det muligt, at et antal mennesker var beskæftiget fuldtids med andet, fx håndværkere, politikere, præster mm. Byer udviklede sig også som en form for sikkerhed mod angreb, jo flere der boede sammen jo lettere var det at forsvare sig.

I begyndelsen udviklede byerne sig tilfældigt, men senere indførte romerne en mere systematisk byplanlægning.

Byerne var ret ensartede. Ikke nødvendigvis så meget i selve den fysiske form, men i styre og struktur. Hertil kom så det særkende den enkelte by kan have haft - en havn, minedrift, god vin, glasfremstilling, skibsbygning m.m.

Til byerne hørte som oftest et opland med landbrug som kunne brødføde byens indbyggere, men

ellers blev især korn transporteret over lange afstande i romerriget. De romerske bystater var som regel selvstændige enheder med både politisk og økonomisk selvstyre.

Man regner med at ca. 90% af de romerske byer har haft 1000 - 1500 indbyggere. Resten er byer som har haft et specielt særkende, der har givet dem mulighed for at vokse sig store.

Bylivet blev for romerne en livsform, som blev spredt rundt om i de områder romerne erobrede. Ofte startede byerne som romerske militærlejre som lå centralt i områderne og derfor voksede. Således opstod fx London, Köln, Mainz, Wien og Budapest.

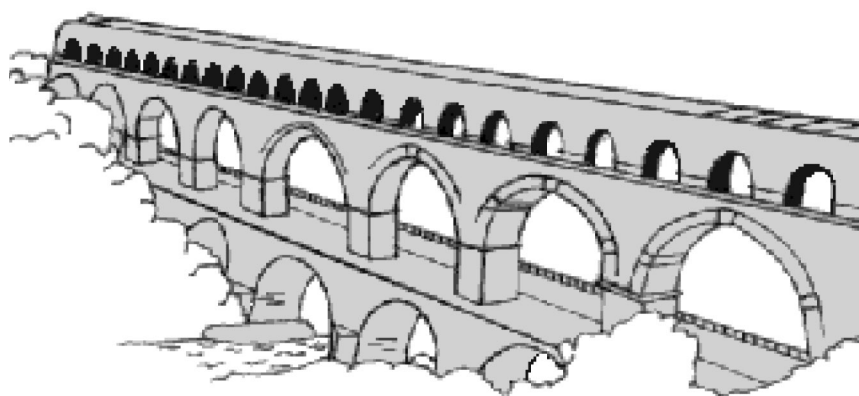
Byens vandforsyning

I romernes anlæggelse af byer blev visse grundelementer vigtige fx en eller flere offentlige bade, vandforsyning og kloaksystem.

Rindende vand var en nødvendighed for romerne. Ingen vand ingen by. Enhver bys placering var derfor valgt med hensyn til sikker og rigelig vandforsyning. I hvert fald skulle vandet kunne hentes indenfor en overkommelig afstand. Nogle byer havde endda tilførsel af både koldt og varmt vand (fra varme kilder).

Opbygning og administration af vandforsyningen var næsten aldrig privatiseret. Man kunne ikke overlade dette til det private initiativ. Det var det for specielt, krævende, dyrt og magtfuldt til.

Staten tog sig af denne ofte store og centrale opgave. Anlæggelse af byer var også en del af statens magtspil overfor underlagte folkeslag. Sagen blev ordnet vha. embedsmænd - i dette tilfælde specialister på området. Disse kunne så sætte arbejdere og slaver i gang med det praktiske.



Her en skitse af Pont du Gard i Provence, hvor vandledningen føres over floden Gard. Vandet løb i en rende allerøverst. Senere tider har udvidet den nederste del lidt, så den kunne fungere som bro.

Vandtilførslen

At føre vand til byerne var en kunst for sig. Fandtes det ikke i selve byen måtte det hentes ind med akvædukter (vandkanaler) fra højere liggende områder.

Når vandet skulle hentes ind til byen måtte sænkninger overbygges med broer. Andre steder måtte der graves kilometerlange underjordiske gange med mandehuller - skakte ovenfra og ned til kanalen, så en mand kunne komme igennem og lave en oprensning.

Der findes eksempler og ruiner af dette over hele det romerske imperium. Her nogle af de større:

Aquincum (Budapest)

5 km lang akvædukt til varmt vand, 1500 piller er sporet.

Tunesien

Fra Djebel Zaghoun til Kartago.

Med sine ca. 132 km akvædukt den længste kendt i romerriget.

Köln

Ca. 100 km akvædukt fra Eifelbjergene. Anslået til at levere 20.000 m³ friskt kildevand pr døgn eller 230 L i sekundet.

Det har været et problem, at bringe vandet frem under det rette tryk, for at sikre et tilstrækkeligt tilløb og en ordentlig fordeling.

Faldet fra kilde til mål skulle beregnes nøjagtigt. Det kunne dreje sig om centimeter på afstande op mod en kilometer.

For at tage trykket af vandet har man nogle steder bygget opsamlingsbassiner. Herfra er vandet så ledt reguleret ind i byen.

Vandet blev ledt ud i byen med terrakottarør (rør af rødt brændt ler) og blyrør. Visse steder blev der også brugt sten og træror. Til sidst løb det væk i byens kloaksystem og ud i et lokalt vandløb.

Vandforbrug

Vand blev brugt til mange ting. Ligesom i dag, men dog noget anderledes.

Her nogle eksempler.

Langt den største del af vandet gik til byens badeanlæg. Ofte flere da en god romer måtte have sit daglige bad.

Der var indlagt rindende vand i nogle af de rige huse. Alle andre måtte hente vandet fra byens fontæner.

Fontænerne har haft deres eget liv. Det har været mødested for slaver fra de riges huse og almindelige folk fra lejlighederne. Fontænerne måtte derfor gerne være pæne at se på og ikke ligge alt for lagt væk. De har også været det sted, man hentede vand ved en ildebrand.

Mange af byens små værksteder har krævet vand. Jern- og andre støberier, smede, keramikværksteder,

glaspusterier, tøjvaskerier, valkere m.m. Her skrives små værksteder, da der ikke var tale om industrier, men nærmere familieforetagener. Af mere eksotisk art kan nævnes at vand også blev brugt til musik - vandorgler var kendt.

Desuden havde romerne offentlige toiletter med rindende vand til skylning. I hvert fald i de bydele der

var dækket af vandforsyningen. Ofte nåede vandforsyningen trods alt ikke ud til hele byens befolkning. Nogle har måttet "gå" efter vand.

Romernes bade (thermer)

En stor del af vandet som blev ført til Rom gik til badene. Derfor lidt om disse.

I Rom og andre byer voksede en badekultur frem. En ordentlig romer måtte have sit daglige bad. Et bad ansås for lise for sjælen. Desuden blev badene byens væsentligste samlingssted.

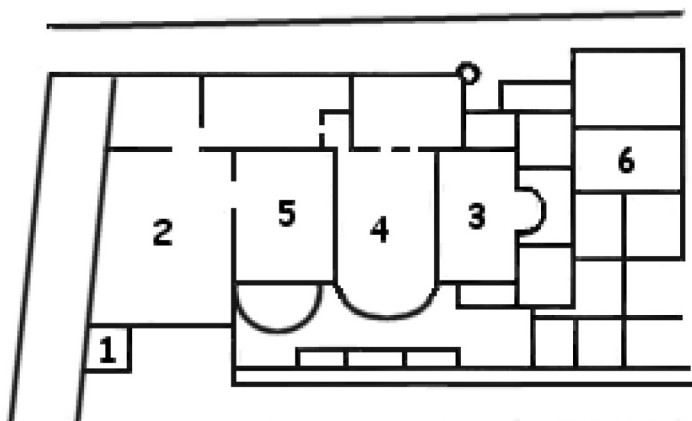
Denne badekultur vokser frem med kejsertiden (27 f.Kr.- 250 e.Kr). Under Augustus fik Rom sine første store offentlige badeanlæg og her-

efter konkurrerede kejsere og rigmænd om at bygge store og flotte badeanlæg.

Adgang kunne fås ved køb af en billet eller med en fribillet udstedt ved "særlige" lejligheder. Prisen var åbenbart lidt dyrere for kvinder end mænd, uden at det i dag fremstår en åbenlys grund hertil (et bad blev mere betragtet som en fortjent fritidsbeskæftigelse for mænd end blot som en afvaskning eller rengøring af kroppen).

Kvinder og mænd badede hver for sig. Man kender opdeltede bade, men som regel var der ikke bade for hvert køn for sig, men forskellige dage eller tidsrum, hvor man kunne bade. Et system man ser visse steder den dag i dag.

Man kom ind gennem en forhal (vestibulen), billeterede og gik så til omklædningsrummet (apodyterium), hvor tøjet blev lagt i nicher og efterladt under opsyn - også dengang var der svind på grund af svage sjæle.



Grundplan for badet i Aquincum. 1 billetsælgeren og opsynsmanden, 2 omklædningsrum (apodytorium), 3 det varme bad (caldarium), 4 det halvvarme vand (tepidarium), 5 det kolde vand (frigidarium) og 6 sved- eller dampbad.

Fra omklædningsrummet kunne man gå til sportspladsen (palæstran) for at dyrke sport eller lege, fx boldspil (en slags bowling var populært). Man kunne også gå til træningssalen og fx vægtræne. Alt sammen med de tilhørende lyde fra folk der gik til den eller lod som om de gjorde. Efter endt møje/ fornøjelse kunne man få skrabet sveden af og endda få masseret de mødige lemmer og vredet skelettet på plads.

Selvfølger har man vel også bare kunnet gå i bad. Det almindelige var åbenbart først at gå til et svederum (sudatorium), et tørt varmt rum eller dampbad. Herefter afvaskede man sig grundigt før turen kom til det meget varme bad (caldarium), hvor led og muskler kunne løsnes op. Efter caldarium fulgte badet med det tempererede vand (tepidarium), hvor man så kølede lidt af inden turen i det kolde bad (frigidarium). Opfrisket og vågen har man så kunnet møde verden.

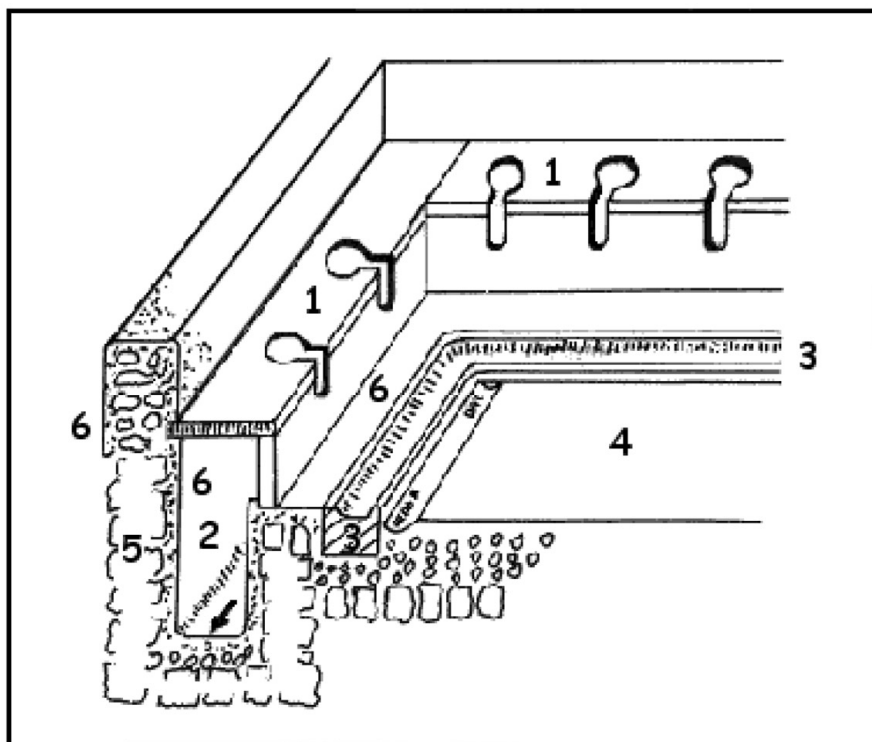
Ud fra termernes opbygning og antal kan man vel læse at pleje af krop og sjæl som helhed var blevet et væsentlig indslag i en romers dagligdag - vel som fjernsynet i dagens Danmark.

Var man undervejs blevet sulten var der også råd for det i form af mulighed for at købe noget at drikke og spise.

Et romersk bad var mere end et bad og motionscenter, snarere et kulturhus. Nogle steder, som i Rom, var der også tilknyttet et bibliotek og kunststilling med søjlegange.

Således var der skabt et sted, hvor man kunne pleje sig selv, bade, hvile efter/under dagens trummerum - alt efter behov i sol eller skygge, tale med vennerne, eller ligefrem føre forretningssamtaler.

En læge var også gerne tilknyttet stedet. Lægen var ofte græker og



uddannet i østen. Lægesproget var græsk - dels fordi det var fagsproget, dels fordi det var et betryggende kvalitetsstempel - mestrede lægen det græske var det nok ikke en helt dårlig læge (det okkulte eller kvaksalveri har ikke været langt væk).

Man kendte til anatomi og undersøgte dette område, men større kirurgiske indgreb har næppe været dagligdagen - mere det at skære bylder og trække dårlige tænder ud. Medicinen har nok for det meste bestået af urter og urteudtræk. En tidsbestemt opfattelse var åbenbart "medicus curat, natura sanat" - lægen lindrer/lapper, naturen helbreder. Det har næppe heller været vor tids folkesygdomme som hjerte/karsygdomme eller kræft der har plaget romerne, selvom man kendte disse sygdomme, men mere betændelses/infektionssygdomme som underlivsbetændelse, blærebetændelse, hals og lungebetændelse samt blodforgiftning eller pest (epidemier af en art) - ikke nødvendigvis mindre fatale her før antibiotikaens og vaccinationernes tidsaldrer.

"En romersk latrin er et lille teknisk mesterværk. På denne rekonstruktionstegning er 1 sædet, som var af enten sten eller træ. 2 er selve latrinen, som skylles igennem af en konstant vandstrøm. 3 er en rende, hvori der ligeledes konstant løber friskt vand. 4 angiver gulvet (af ler eller stenbelagt), igen med en rende, som tjente som afløb ved rengøring. 5 og 6 er murværk og puds. Gennem hullet under selve sædet kunne man så tørre sig - som regel med en svamp dyppet i eddike. Var det mon ment som en sidste forhåelse, da en romersk soldat rakte Kristus på korset en svamp dyppet i eddike? En romer måtte uvægerligt få samme association" (Peter Ørsted)

Et andet ikke mindre vigtigt sted i badet har været de offentlige toiletter. Det må have krævet en vis frimodighed at sidde på rad og udgyde sine efterladenskaber med evt forpint lettelse og lyd - med mindre en vis kammeratlig tone har været på sin plads. Dette sidste kunne det tyde på ud fra inskriptioner eller fresker om at man "ved

at klappe sig på maven kunne få en god afføring” eller hvordan man lærte “at fjerte uden at andre kunne høre det”.

Et bad har således været et centralt og levende sted. Ud over de badende har der været en del mennesker beskæftiget med at holde stedet i gang - transportere varer ind og ud, fyre, gøre rent, servicere m.m.

Hele badet blev holdt i gang fra kælderen. Her blev der opvarmet vand. Opvarmet luft til gulv- og vægvarme samt til sauna eller svederum.

Overalt blev der fyret med træ eller trækul. Dette er en af de ting der var med til at afskove sydeuropa den gang.

Selve arbejdet blev udført af slaver tilset af en bademester. Man mener dog at slaver med en højere status havde adgang til badet også.

Byen Roms vandforsyning

En oversigt

I de første 4-500 år af Roms historie, mener man byen fik sit vand fra kilder, brønde, vandløb og Tiberen. Der var rigeligt med vand lokalt.

Omkring 312 f. Kr. var der opstået et behov for mere vand til byens befolkning. Den første akvædukt Aqua Appia blev derfor bygget.

Denne akvædukt fulgtes af flere i de kommende århundreder. Den sidste i 226 e.Kr.

På den tid stod der elleve fungerende akvædukter. I byen fandtes da utallige fontæner (faktisk 1212 - et tal man skulle være rimelig sikker på), mange badeanstalter samt private huse med indlagt vand.

Opbygningen af dette forsyningsnet var således spredt over lang tid. Det har vel fulgt udviklingen i by-

Liste over Roms akvædukter. Deres forløb ses på kort 1 og 2.

ens indbyggertal og dets behov for vand, men ikke mindst ønsker om brug af vand til andre og nye formål - bade, teater, mindre virksomheder og til at holde byen ren.

I disse fem århundreder skete der også en teknisk udvikling. - Bygget dels på egne erfaringer samt viden hentet fra Grækenland og Asien. Specielt kan nævnes udviklingen af bindende mørtel - beton.

At vandforsyningen dog ikke altid har fungeret lige godt høres i beret-

ninger om vandmangel, misrøgt af kanaler, byggesjusk lavet af de hyrede entreprenører, vandtyveri vha huller folk selv har lavet eller ulovligt tilsluttede rør opnået ved bestikkelse af folk i byens “vandvæsen”.

4-500 år e.Kr. begyndte Rom, at blive truet og plyndret af gotherne. Faktisk er det gothere, der på et par dage i 537 e.Kr. afbrød en del af akvædukterne. Romerne kom dog ikke til at tørste, men ting som kornmøller blev stoppet.

Akvædukt	Bygget	Bygherre
Appia	ca. 312 f.Kr.	Censorer Appius C. Caecus og Gajus Plautius
Anio Vetus	272-269 f.Kr.	Censor Dentatus
Marcia	144-140 f.Kr.	Praetor Marcus Rex
Tepula	125 f.Kr.	Censorer Caepio og Longinus
Julia	33 f.Kr.	Aidil Marcus Agrippa
Virgo	19 f.Kr.	Praetor Marcus Agrippa
Alsietina (Augusta)	2 f.Kr.	Kejser Augustus
Claudia	38-52 e.Kr.	Kejserne Caligula og Claudius
Anio Novas	38-52 e.Kr.	Kejserne Caligula og Claudius
Trajana	109 e.Kr.	Kejser Trajan
Alexandrina	226 e.Kr.	Kejser Alexander Severus

Møllerne blev udskiftet med møller drevet af Tiberen, men vandforsyningen fra de ødelagte akvædukterne genrejstes ikke. Der laves dog enkelte små reparationer op til 800-900 e.Kr.

Vandforsyningen fra akvædukterne gik med tiden simpelthen tabt. Selv "teknikken" blev bogstavelig talt glemt. Tilbage stod nogle ruiner af termer, fontæner og akvædukter.

Byen måtte i de følgende århundreder igen forsyne sig med vand fra kilder, brønde Tiber m.m. Dette vand slog også til, for byen var nu som tidligere nævnt også blevet temmelig affolket.

Indsatsen, der krævedes for at holde akvædukterne i gang, er vel blevet for stor i forhold til, hvor enkelt det var, at skaffe vand nok på andre måder.

Sådan var det i hen ved 500 år. Langsomt kom der dog lidt gang i byen Rom igen. Presset på vandforsyningen blev derfor øget. Fx er der omkring 1400 - 1500 ikke vand over

hele byen. Vandsælgere var dengang lige så hyppige som mælkemanden herhjemme for nogle årtier siden.

På dette tidspunkt var paverne ved at sætte gang i Roms udvikling/genopbygning. Faktisk havde de prøvet og prøvet at få lov til det i fred for andre siden 800-900, men nu skete der noget.

Indenfor vandforsyning kom der i 1429 et slags vendepunkt. I det år blev der i Benediktinerklosteret ved Monte Cassino fundet et værk om det gamle Roms vandforsyning. Det er godt nok en afskrift med fejl og huller i teksten, men det oprindelige værk var skrevet ca. 100 år e.Kr.

Forfatteren er Sextus Julius Frontinus, der på det tidspunkt stod for ledelsen af Roms vandforsyning. Frontinus blev under Nervas og Trajan sat i gang med at udbedre vandforsyningen, som der på det tidspunkt var en del problemer med. Han var effektiv og nedskrev en detaljeret oversigt af tidens vandforsyning.

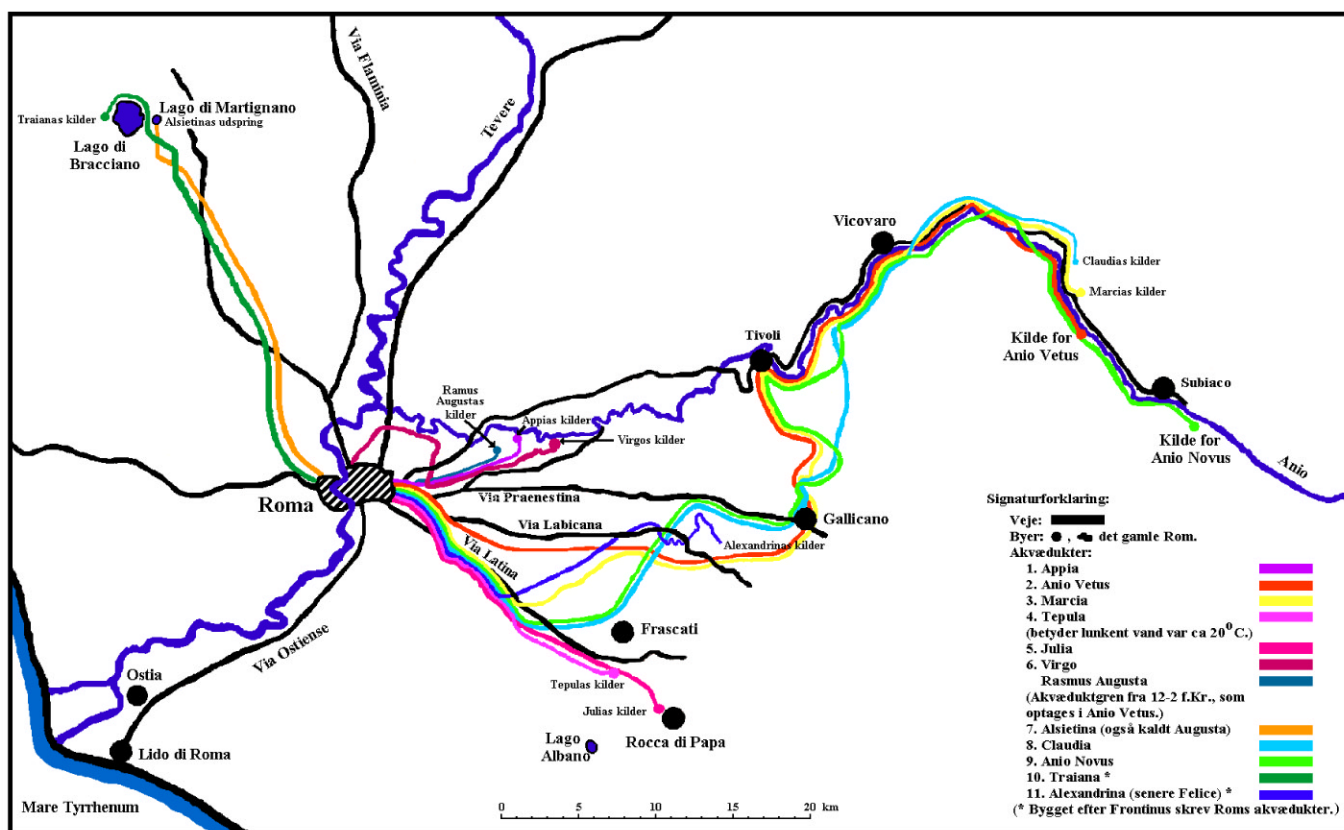
Fundet af skriftet fik paverne til at indse betydningen af friskt vand, samt den anseelse et sådant bygningsværk giver.

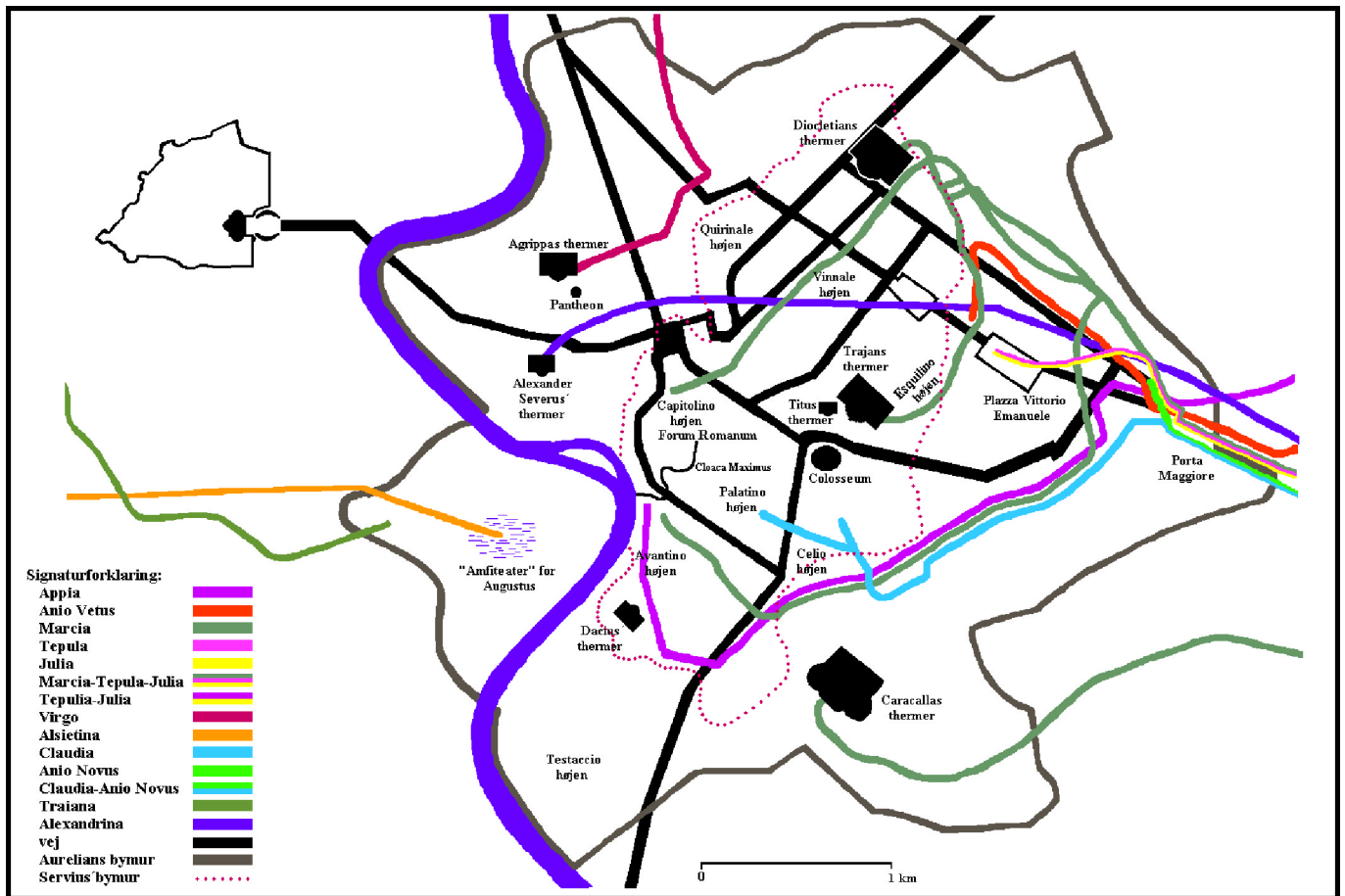
I 1453 restaureres Aqua Virgo og bliver til Aqua Virgine. I 1586 bygges den næste akvædukt Aqua Felice, hvor der sker et delvis genbrug af Aqua Alexandrina. Derpå i 1611 Acqua Paolo (før Trajana) og 1870 Acqua Pia Antica Marcia, hvor kanalen er ny men kilden den samme som for Marcia.

Alle disse akvædukter blev sat i gang af paver. Det er dog kun de tre første, der er rekonstruktioner af gamle romerske akvædukter.

Pavernes vandforsyning lykkes så godt, at Rom i de år danner lidt af en skole for vandforsyning af de større byer i Europa. - Helt op i 1800 tallet.

Kort 1: Skitse over akvædukter udenfor Rom.





Disse fire akvædukter bruges den dag i dag. Teknikken er dog "moderne" og selve linieføringen lidt anderledes.

Byen Roms udvikling til storby har i dette århundrede krævet en tilsvarende øgning i vandtilførslen. Der er derfor bygget flere hovedvandedninger.

Mange ting er derfor helt anderledes nu. Alligevel går der spor tilbage i tiden.

Nutidens Rom henter fortsat en del af sit vand i de gamle områder. Dog ikke alt sit vand, da forbruget er meget større og derfor har krævet nye kilder også. Endvidere har linieføringen kunnet ændres pga nutidens brug af pumper.

Et andet spor er fontænerne. Der er ikke nogen tilbage fra det helt gamle Rom og deres egentlige rolle er udspillet. De er dog stadig en væsentlig brik af Roms bybillede og forsynes stadig (om end kun delvist) med drikkevand.

Kort 2: Skitse af akvædukter i Rom. Akvædukternes linieføring blev efterhånden udbygget, f.eks. blev Marcia, der oprindeligt kun gik til Capitol, tilføjet ekstra kilder og en ny gren ind til Rom, da Caracallas termer blev bygget. Med tiden byggedes en række termer, her er der dog kun angivet nogle.

Vandets vej til Rom

Af Roms 11 akvædukt havde 8 udspring fra kilder og tre udnyttede overfladevand.

Opsamling af vand fra søer og floder skete med et direkte afløb.

Ved kilder brugte man nedgravede bassiner. Disse blev muret op på et fundament. I muren var der "åbninger" med mørtelfri mur, så vandet kunne trænge ind. Sådanne bassiner er ikke bevaret ved Rom. De findes andre steder. Der er endda eksempler på, at vand, der findes under tryk i undergrunden, er bragt til at løbe op i bassinet ved overfladen.

Ofte har flere bassiner været koblet sammen for at få vand nok. En akvædukt kunne på sin vej til Rom også samle vand op fra flere områder.

Det opsamlede vand blev ledt til fældningstanke/klaringstanke. Disse kunne dog godt først ligge inde ved Rom.

Ved tanken skete følgende. Vandet løb fra kanalen ud i et stort bassin. Heri bevægede vandet sig langsommere end i kanalen. Dette gav ro til, at grus, sand m.m. kunne nå at bundfælde sig, inden vandet løb ud igen. Mudder i overfladevandet blev dog ikke fjernet særlig godt - specielt flodvandet gav problemer.

Porte gjorde det muligt, at regulere, stoppe eller omlade vandet, så bassinerne kunne renses ud. Vandet blev ledt til Rom gennem akvædukternes kanaler. Disse var gerne muret. Indvendig var kanalerne pudset på en speciel måde, så de var vandtætte. De var desuden overdækkede.

Akvædukt	Vand fra
Appia	Kilder ved Salone (øst for Rom)
Anio Vetus	Floden Anio (Aniene)
Marcia	Kilder ved Subiaco (øst for Rom)
Tepula	Kilder ved Grotta Ferrata (Albanerbjergene)
Julia	Kilder ved Grotta Ferrate (kilder tæt ved Tepulas)
Virgo	Kilder ved Salona (øst for Rom)
Alsietina (Augusta)	Søerne Martignano og Bracciano
Claudia	Kilder ved Subiaco (øst for Rom)
Anio Novas	Floden Anio (øst for Rom)
Trajana	Kilder nord for søerne Bracciano
Alexandrina	Kilder ved Patano (øst for Rom)

For at vandet kunne løbe fra opsamlingsstedet og ind til Rom måtte kanalen have en vis hældning. Dette har givet anledning til eftertanke.

Landskabet har skullet kortlægges eller undersøges, for at finde en brugbar vej for kanalen. Også gerne lagt sådan, at den let kunne tilses ved vedligeholdelsen. Desuden skulle vandet have en vis højde eller tryk, når det ankom til Rom, for at kunne fordeles ordentligt og i rigelig mængde.

Dette har stillet krav om viden, fx om måling af kanalens stigningsgrad (se opgave 2, 3 og 4) og om konstruktion af bygningsværker.

Som fortalt skete der også en teknisk udvikling indenfor vandforsyning. Denne førte til mere teknisk dristige løsninger pga øget kunnen og viden, hvilket ses brugt i de nyere akvædukt og ved udbedring af de gamle.

Udviklingen viser sig fx ved større og højere byggeri af arkader og brug af trykrør ved passage af dale (se opgave 20).

Disse ting gør linieføringen af kanalerne mere fri af landskabets form. At det udnyttes kan ses ved at sammenligne tal for Marcia og Claudia i tabellen nedenfor. De har udspring næsten samme sted, men alligevel er længden ret forskellig. Forskellen skyldes broanlæg ude i bjergområdet. Marcia har 700 m mod Claudia's 4,5 km. Udviklingen i de mellemliggende 190 år kan ses.

En anden ting der kom til var vandreservoirer. De blev brugt til at udglatte svingninger i vandforsyningen hen igennem året, eller for gennem natten at samle vand til et stort forbrug om dagen. I Rom ses reservoirer dog kun i forbindelse med kejsertidens store badeanlæg, fx Trajans termer. Grunden er, at Rom blev så godt forsynet, at vand altid kunne reguleres om i byens kanaler, når det kneb et sted.

Akvædukt	Total kanal-længde km	Kanallængde under jorden km	Kanallængde mur/arkade km	Vand- mængde m ³ /døgn
Appia	16,55	16,46	0,089	73.000
Anio Vetus	63,60	63,27	0,327	176.000
Marcia	90,83	79,84	10,98	188.000
Tepula **	18	ca. 8	ca. 9	18.000
Julia	22,8	10,30	10,30	48.000
Virgo	20,86	19,03	1,83	100.000
Alsietina (Augusta)	32,73	32,2	0,529	15.000
Claudia *	68,6	53,6	15,0	184.000
Anio Novas *	86,8	72,9	13,9	190.000
Trajana ***	58	meste	---	140.000
Alexandrina ***	22	---	---	21.200

Her lidt data om Roms akvæduktioner. Tallene er fra Frontinus's værk, idet dog (*) har ca. 10 km fælles arkade ind til Rom, (**) er nyere tal end ved Frontinus og (***) er bygget efter Frontinus's tid.

Datidens reservoirers størrelse tåler dog ikke sammenligning med nutidens.

Af tallene ses bl.a., at kun en lille del af akvædukten har været over jorden. Resten har været gravet ned. Ofte dog kun lidt under jordoverfladen. Dybe tunneller var ikke hyppige. Tunneller med en længde på 50 m til 400 m var ikke ualmindelige. En af de længste skønnes at have været mindst 2,25 km lang. Kanalerne gik omkring bjerge, så tunneller anvendtes almindeligvis hvor bakker, vandskel eller pas mellem to bjerge skulle gennembrydes.

Desuden fortælles, at den nedgravede kanal var mere robust og enklere at vedligeholde. Dette blev gjort gennem mandehuller for hver 35 - 70 m kanal. Tallene viser også noget om hvor stort et grave- og hugge-arbejde, der måtte laves for at bringe vandet frem til Rom i en pæn højde.

Frontinus's tal fortæller, at der på hans tid blev ført 992.000 m³ vand

frem til Rom pr døgn. Ud fra data om ledningsnettet mener man dog, det kan have været lidt mindre (ca. 560.000-992.000 m³ pr. døgn). Der er altså en del usikkerhed på størrelsen.

Når vandet kom til byen, blev det ledt til en hovedfordelingstank (castellum). Her blev vandet siet og delt i tre ens, men regulerbare dele. Tanken var bygget så en god del af vandets fremdrift blev bevaret. Fra tanken blev vandet ledt bort i blyrør.

Hvorfor vandet lige blev delt i tre dele og hvorhen det blev ledt er i dag uklart. Man har endnu ikke fundet og registreret et sammenhængende netværk

Fra hovedrørene blev vandet ledt ud til en række fordelingstanke i byen. Fra disse førte rør så ud til forbrugerne (se opgave 21 og 22).

Det fortælles, at en af grundene til disse tanke var, at de lettede tilslutning og reparation af forbrugerrør, bl.a. ved ikke at involvere

hovedrøret for ofte. Desuden mindskede det vandets tryk inden det nåede forbrugerne.

Vandet i Rom var beregnet for byens fællesskab. Udvalgte borgere og små værksteder kunne dog opnå personlig tilladelse til at have indlagt vand. - Det var dog et privilegium. Det almindelige var, at hente vand ved byens fontæner. En del af vandet var det nødvendigt at lede direkte i kloakkerne for at holde dem i gang.

Efterhånden som flere akvæduktioner kom til, blev byens ledningsnet også udbygget. På Frontinus's tid ca. 100 e.Kr. kunne alle byens kvarterer dækkes af mere end en akvæduktion ved at vandet kunne omledes i byens kanaler. Forsyningen blev på denne måde sikret, selv om der blev lavet reparationer.

Om forsøg med vand

Vand er en væske

Til daglig regner vi med, at en bestemt mængde væske har en bestemt masse, samt at denne ikke ændres fordi væsken opvarmes, ændrer facon ved at blive hældt på en anden beholder osv.

Massefylde

I forsøg 1 undersøges om vand presses sammen i en vandsøjle.

Væsker regnes normalt for at være usammentrykkelige. Dvs. at massefylden ikke er afhængig af trykket. Derfor skulle forsøg 1 gerne vise, at den nederste del af vandet ikke presses sammen pga den vandsøjle, der presser ovenfra.

Væskers massefylde kan findes direkte som i forsøg 2.

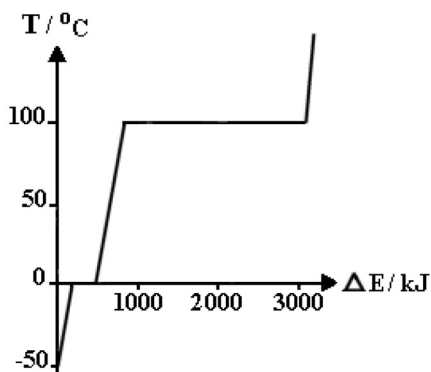
En anden størrelse man kunne forvente væskers volumen afhang af er temperaturen. Det gør volumenet faktisk, dog ikke nødvendigvis meget eller lige meget i alle temperaturintervaller. Dette gælder også for vand. Forsøg 3 viser lidt om denne afhængighed.

Faser

Vand består jo af H_2O molekyler. Fra det daglige kendes dette stofs faser:

is vand damp

Nu ses på en isklump på 1 kg med temperaturen $-50\text{ }^\circ\text{C}$. Tilføres isklumpen energi kan der tegnes et diagram over sammenhængen mellem temperaturen og den tilførte energi ΔE .



Isklumpens skæbne tegner sig klart. Smeltepunktet er $0\text{ }^\circ\text{C}$ og kogepunktet er $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Karakteristiske konstanter p og T afhængighed

Faktisk afhænger både kogepunktet og smeltepunktet af trykket. Man kan godt opleve, at vand koger ved en lavere temperatur end $100\text{ }^\circ\text{C}$, - fx når barometerstanden en dag er lidt lav eller man nu koger vand til te på en bjergtop.

Et lille forsøg viser dette. En rundkolbe fyldes halvt med vand. Vandet bringes til kogning, der sættes en prop i kolben og kolben afkøles under en koldt vandshane. Trods den lavere temperatur koger vandet.

Trykket i kolben er nemlig blevet mindre end 1 atm.

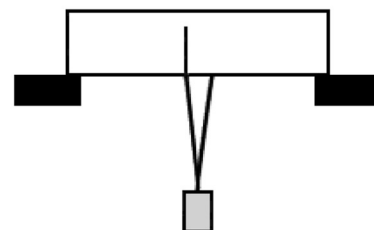


I praksis bruges denne viden direkte fx i en højtryksskoger. Her gør et større tryk og et lidt øget kogepunkt, at grønsagerne hurtigere bliver møre.

Vand kan også blive til damp uden, at det koger. Ellers blev vasketøj næppe tørt. Ved enhver temperatur er der nogle vandmolekyler, der har en større bevægelsesenergi end andre. En brøkdel af disse kan undslippe fra tøjet.

Fordampningen kræver energi, ca. 2400 J/kg ved $20\text{ }^\circ\text{C}$. Luftstrømme om tøjet samt luftens tørhed og dermed dens evne til at optage vand spiller også ind.

Isens smeltepunkt er også afhængig af trykket. Følgende lille forsøg viser dette.



En isbarre (lavet i forvejen i en mælkekarton) anbringes som bro mellem to stole. En metaltråd lægges midt over isen og bindes til et 5 kg lod.

Man vil se at tråden skærer sig igennem isen. Isen skæres dog ikke over! Grunden er, at trykket er større under tråden og frysepunktet derfor lavere. Under tråden smelter isen. Over tråden fryser vandet atter, da trykket er lavere så frysepunktet her ligger højere - ved $0\text{ }^\circ\text{C}$.

Faktisk afhænger varmfylden lidt af temperaturen. Dette gælder også for vand. Se opgave nr.7.

Flere stofkonstanter

Der er nu lagt op til et par kendte forsøg for at bestemme nogle af vands stofkonstanter. I forsøg 5, 6 og 7 arbejdes der med vands varmekapacitet, vands fordampningsvarme og isens smeltevarme.

Når is smelter, vand opvarmes og vand fordampes tilføres der energi. Ved smeltning og opvarmning bliver praktisk talt al den tilførte energi til termisk energi.

Ved fordampning er det anderledes! Når H_2O skifter form fra vand til damp, sker der en stor volumenændring. Dvs. at den tilførte energi ikke kun omsættes til termisk energi for H_2O , men også bruges til at udføre et arbejde på omgivelserne (atmosfæren), for at "skaffe plads" til vanddampen.

I alt det foregående er der kun omtalt rent stof, H_2O . Blandes andre stoffer i, får dette også større eller mindre virkning på blandingsens egenskaber. Dette udnyttes fx ved saltning af veje og fortove. Saltet opløses og giver "vandet" et lavere frysepunkt.

Vands opvarmning

For at opvarme vand kræves jo energi. Denne må hentes fra en forhåndenværende energikilde. I Danmark er de vigtigste kilder kul, olie og naturgas. I romerriget var det træ, kulbækkener i rum uden ovne og olivenolie til lamper.

Opgave 8 til 10 og 12 samt øvelse 8 handler om forskellige brændsels brændværdi.

Tryk fra en vandsøjle

Tryk er indført som størrelsen af den kraft der virker vinkelret ind på en overflade, divideret med overfladens areal, dvs.

$$P = \frac{F}{a} \quad \text{enhed: N/m}^2 = \text{Pa}$$

En vandsøjle påvirker det, der er under den med et tryk.



a søjlens tværsnitsareal
h søjlens højde

Vandet i søjlen har massen

$$m = \rho \cdot a \cdot h$$

hvor ρ er vandets massefylde.

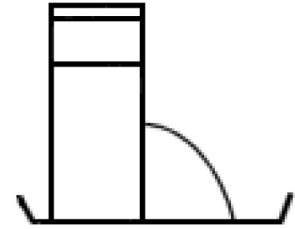
Tyngdekraften på vandet er så

$$F = m \cdot g$$

Derfor bliver trykket fra søjlen

$$P = \frac{F}{a} = \rho \cdot h \cdot g$$

Opgave 13 viser lidt om trykket fra en vandsøjle. Det gør følgende lille forsøg også.



Der bruges en tom og ren mælkekarton. Denne er forsynet med tre ens huller i forskellige højde. Der sættes et stykke tape over hullerne.

Kartonen fyldes med vand og anbringes i en bakke. Fjern tapen hurtigt.

Spørgsmål:

- Hvad sker der?
- Hvad kan forklaringen være?

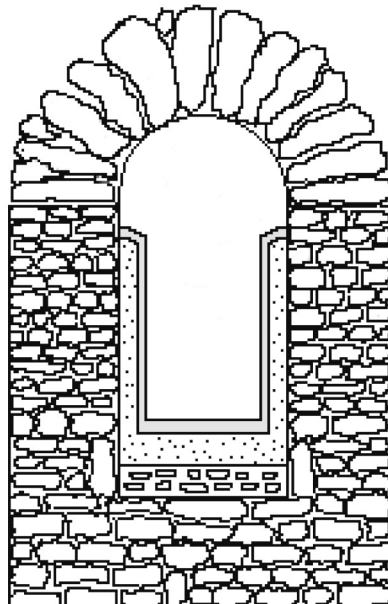
Vandstrøm i kanaler

I akvædukterne løb vandet i en overdækket kanal. Kanalen var så stor at et menneske kunne komme frem og arbejde med reparation og vedligeholdelse indeni. Vandet strømmede frem i bunden uden at fylde det hele.

Vandets bevægelse igennem akvædukten er bestemt af kanalens udformning og vedligehold. Dvs. af ting som stigning, sidernes glathed, højde af vandstand, forhindringer, tilkalkning og årstiden (vandindtagningen).

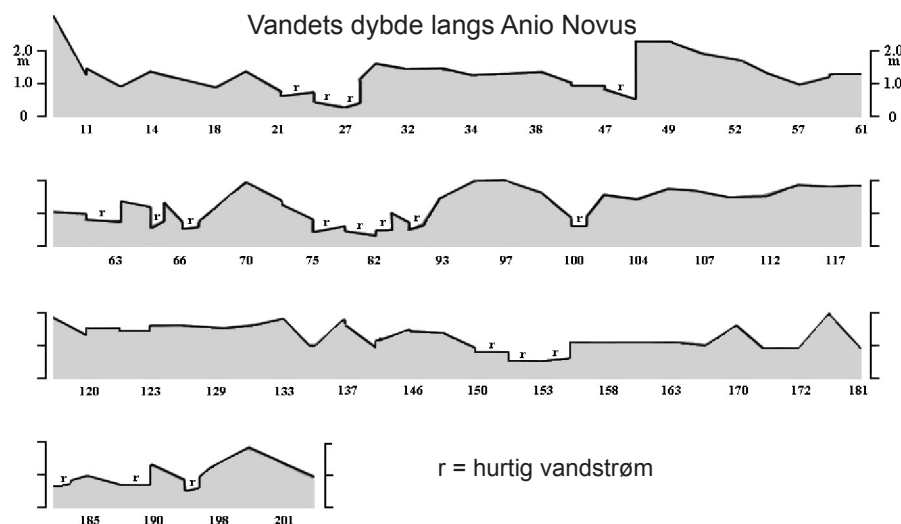
Forholdene ændrede sig hen igennem en akvædukt. Vandets hastighed og højde kunne derfor være ret forskellig undervejs. Der ville dog altid løbe det samme volumen igennem som der løb ind, med mindre der var en læk et sted.

Blacmans figur viser at vandhøjden kunne variere fra 30 cm til over 2 m op til flere gange. Bemærk at der hvor vandstanden er lav står r (rapid) for hurtig strøm. En sådan strækning kan være fulgt af en brat stigning, dvs. et skifte fra en hurtig



Overdækningen bestod af et muret hvælv, stenplader eller andet. På den måde blev skidt og blade holdt ude og vandet kunne bedre holde sin temperatur.

Vanddybden langs Anio Novus som beregnet af Deane R. Blackman.



strømning med lav vandhøjde til en langsom strømning med stor vandhøjde. Grunden kunne være at stedet lå for enden af en bakke eller fordi vandet hobede sig op foran en flaskehals (fx en smal kanal eller en kanal med en meget svag hældning). Således bliver det samlede kanalbillede meget varieret sammensat.

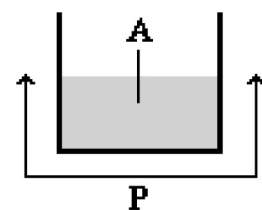
Til bestemmelse af den gennemsnitlige hastighed et sted i en kanal anvendes ofte Chezy's (1718-1782) og Bazin's (1829- 1917) formel

$$v = c \sqrt{R \cdot S}$$

her er

v den gennemsnitlige hastighed
 c en konstant, der afhænger af kanaloverfladens glathed
 R den hydrauliske radius

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\text{tværsnit af vandet}}{\text{sidelængde i kontakt med vand}}$$



S er kanalens stigning angivet i m pr. m kanallængde.

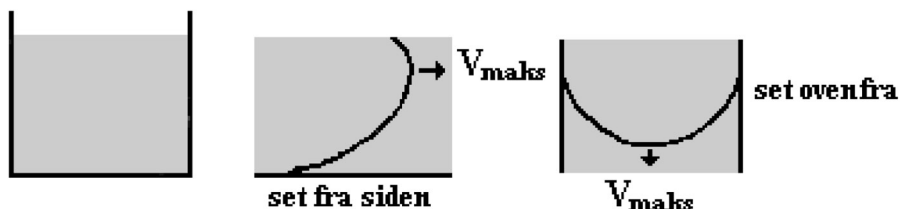
Selve formelen er opstillet ud fra resultater af en række eksperimenter.

Formlen er i tidens løb blevet forsøgt revideret ud fra en række måleresultater fra eksperimenter. Ønsket har været at få et udtryk for C som kunne bruges når kanalen var lavet af bestemte materialer. Manning (1816-1897) opstillede en formel der er mere nøjagtig for langsomme strømme som dem i akvædukter.

$$v = k \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

hvor
 k er en konstant, der afhænger af kanaloverfladens ruhed
 R og S som ovenfor.

Ser man nøjere på hastigheden i kanalen bliver billedet mere sammensat. Følgende figurer skitserer hastighedsfordelingen der kan måles i et tværsnit af en kanal.



Den maksimale hastighed v_{maks} fås midt i kanalen og lidt under vandoverfladen. Slår kanalen et sving eller lignende ændres billedet. Hvad der sker med vandstrømmen de forskellige steder i en kanal kan kun følges ved at se på forholdene hen igennem kanalen.

er den normale hastighed i moderne akvædukter under 1,2 -1,3 m/s.

Formodentligt har det dog haft mere betydning hvor meget vand der nåede frem i løbet af en dag og med hvor stor højde, end hvor hurtigt det nåede frem fra kilden.

Angivelse af vandets hastighed i en akvædukt kan derfor kun gives med et interval. I litteraturen kan man finde bud på 1,0 til 1,5 m/s som normalværdier. Til sammenligning

Udledning af Chezy's og Bazin's formel på en forenklet måde

Der ses på vand der løber med en konstant hastighed v gennem kanalen.

Vandet løber på grund af kanalens hældning

$$\tan \Theta = \frac{h}{l}$$

Nu ses på et rumfang vand

$$V = a \cdot b \cdot dx$$

med massen

$$m = \rho \cdot V$$

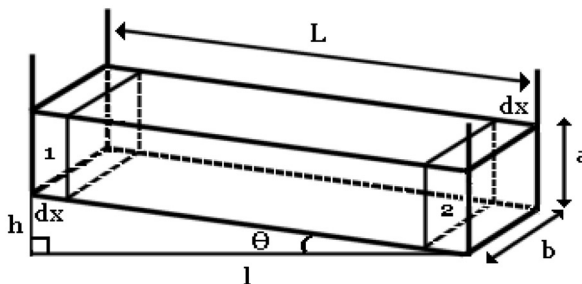
som bevæger sig ned gennem kanalen fra 1 til 2.

Vandmassen får ikke mere fart på. Tabet i potentiel energi må så være lig energitabet på grund af gnidningen.

Det vil sige

$$m \cdot g \cdot h - F_{gnid} \cdot L = 0$$

hvor vi antager at



$$F_{gnid} = k \cdot v^2 \cdot (2a + b) \cdot dx$$

dvs. at gnidningskraften er proportional med v^2 og arealet af væskelovolumenet mod kanalen.
 k er en slags gnidningskoefficient.

Dette giver

$$m \cdot g \cdot h - F_{gnid} \cdot L = 0 \Leftrightarrow$$

$$\rho \cdot a \cdot b \cdot dx \cdot g \cdot L \cdot \sin \Theta =$$

$$k \cdot v^2 \cdot (2a + b) \cdot dx \cdot L \Leftrightarrow$$

$$v^2 = \frac{\rho g}{k} \cdot \frac{a \cdot b}{(2a + b)} \cdot \sin \Theta$$

For små Θ er $\sin \Theta$ ca. lig $\tan \Theta = h/l$, som er kanalens hældning.

Dermed fås

$$v = c \sqrt{R \cdot S}$$

hvor

$$c = \sqrt{\frac{\rho g}{k}}$$

$$R = \frac{a \cdot b}{(2a + b)}$$

$$S = \frac{h}{l}$$

Se også opg 18.

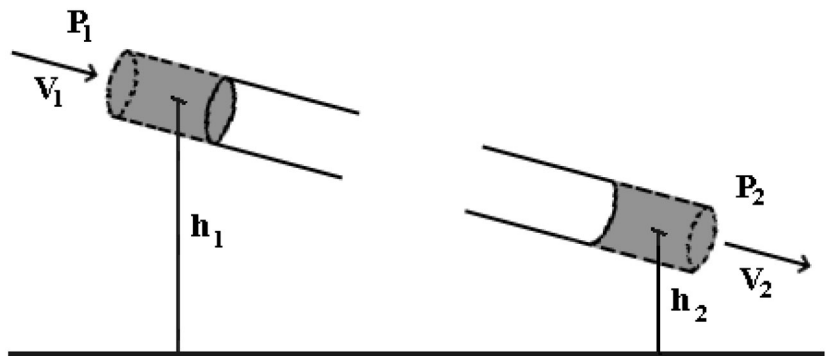
Vandstrøm gennem et rør

Fra akvædukterne blev vandet ledt hen hvor det skulle bruges. Den sidste del af vejen førtes det gerne i rør. Derfor ses i det følgende på vandstrøm gennem et rør.

Her ses dog kun på vands stille og rolige løb gennem et rør. Dvs. at noget af vandets bevægelsesenergi omsættes til termisk energi på grund af hvirvler og gnidning ses der bort fra.

Set på den måde er vandets bevægelse i røret beskrevet ved Bernoullis ligning, der ses til højre. Her er P vandets tryk, v vandets hastighed, h vandets højde ved 1 og 2 og ρ er vandets massefylde.

I ord siger Bernoullis ligning, at vandets energi pr. volumenenhed er konstant overalt i jævnt strømmende vand.

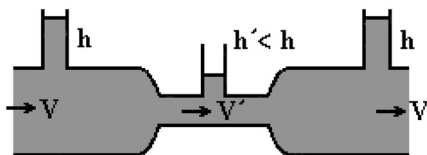


Bernoullis ligning

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Eksempel: Strømningsrør

Vandets tryk og hastighed i et rør er afhængige af hinanden. Et lille forsøg kan illustrere dette.

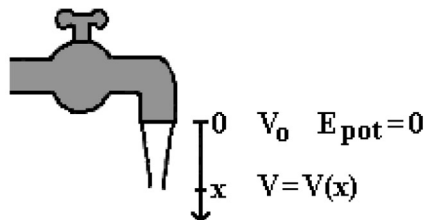


Vandet løber jævnt gennem røret. Trykket i røret ses af vandsøjlernes højde. Vandets hastighed må være størst i det smalle rør, når der hele tiden løber lige meget vand igennem overalt.

Da energien pr. volumenenhed skal være konstant, er trykket i det smalle rør mindst.

Eksempel: Jævnt løbende vandhane

Bernoulli's ligning gælder også for en jævnt løbende vandhane.



For vandets hastighed et stykke x nede er

$$v(x) = \frac{a_0}{a_x} \cdot v_0 = \left(\frac{d_0}{d_x}\right)^2 \cdot v_0$$

hvor d står for strålens diameter og a er strålens tværsnitsareal ved henholdsvis 0 og x .

Det ydre tryk uden for hane er ens overalt, atmosfæretrykket. Bernoulli's ligning kan derfor skrives

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot v(x)^2 - \rho \cdot g \cdot x \Leftrightarrow$$

$$v_0^2 - v(x)^2 = -2 \cdot g \cdot x \Leftrightarrow$$

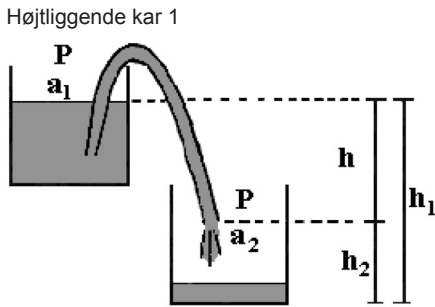
$$v_0^2 \left(1 - \left(\frac{d_0}{d_x}\right)^4\right) = -2 \cdot g \cdot x \Leftrightarrow$$

$$d_x = \frac{d_0}{\sqrt[4]{1 + \frac{2 \cdot g \cdot x}{v_0^2}}}$$

Så vandstrålens diameter bliver mindre nedad. Dette kan man jo enkelt forvisse sig om.

Eksempel: Hæverten

Mange har i tidernes morgen nok prøvet følgende.



Lavtliggende kar 2

Der trækkes vand ovenud af kar 1 til kar 2. Det starter godt nok ikke af sig selv. Slangen skal først fyldes med vand, men så løber det også.

At vandet løber skyldes tyngdens træk i slangens vand - specielt i vandsøjlen h , samt at der ikke slipper luft ind i slangen.

Ses på det enkle tilfælde, hvor vandoverfladen i kar 1 ikke sænker sig, kan udløbshastigheden findes. (Kar 1 kan fyldes efter hele tiden eller være så stort i tværsnit at vandstanden ikke synker særlig meget).

Trykket er ens, atmosfæretryk, ved de to ender. I det store kar er vandets hastighed ca. 0 ved overfladen.

Fra Bernoulli's ligning fås

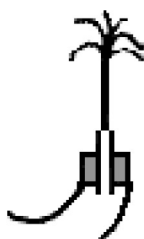
$$\rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \Leftrightarrow$$

$$g \cdot h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + g \cdot h_2 \Leftrightarrow$$

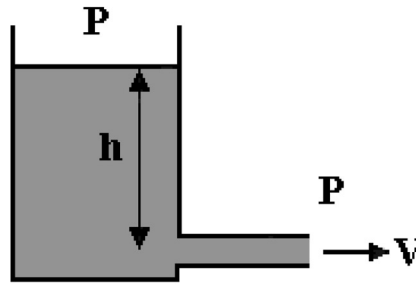
$$v_2 = \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)} = \sqrt{2g \cdot h}$$

Når indløbets tværsnitsareal er meget større end udløbets, så er v_2 altså kun afhængig af højden h .

For illustrativt at se at udløbshastigheden vokser med h , kan hæverten laves til en fontæne. Man vil se, at vandet springer højere jo større h er.



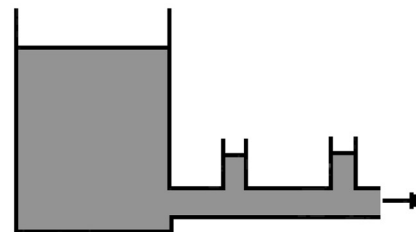
Eksempel: Det lige tykke, vandrette rør.



Her holdes vandoverfladen i det store kar konstant i højden h over udløbet. Udløbshastigheden er også her $v = \sqrt{2gh}$. Røret har ens diameter i hele sin længde. Dets tværsnitsareal a er så ens overalt.

Der løber hele tiden det samme volumen vand ind og ud af røret. Derfor er vandets hastighed ens overalt i dette rør. Dette betyder blot, at vandet opnår sin hastighed inde i den store beholder. Hastigheden når op på v ved rørets indgang.

Hvordan det går med trykket inde i røret kan undersøges med denne opstilling.



Når vandet løber jævnt igennem røret, skal vandhøjderne i de to stigrør gerne være

- lige høje
- inderste højest
- yderste højest

Sæt x og begrund svaret.

Forsøg 11 viser lidt om vandhastighedens afhængighed af højden h . Nu ved vi en hel del om væskers strømning i rør. Alligevel er der meget mere at undersøge, men det ville være at gå "for langt" for os nu.

Eksempler på "huller"

- Vi har sagt, at der ikke overføres energi fra strømmingen til termisk energi. Dvs. der er set bort fra gnidning og dannelse af hvirvler i vandet. Dette passer ikke.
- Vandet helt ude ved rørets inder-væg står faktisk stille. Dvs. hastigheden er ikke ens for hele rørets tværsnit.
- Betydningen af rørets længde.

Dette er der ingen grund til at være ked af. Man kommer ikke længere uden en mere detaljeret fysisk beskrivelse og start af et større matematisk apparat.

At noget ikke er helt forklaret kan ses ved fx forsøg 12 og forsøg 13. Forsøg 12 ser lidt på vandhastighedens afhængighed af rørets radius r . Forsøg 13 ser på vandhastighedens afhængighed af rørets længde l .

Løber vandet ikke for hurtigt og medtages omsætningen af bevægelsesenergi til termisk energi pga. friktion, så kan man beregne, at volumen, der strømmer ud pr. tid

- afhænger af rørradius r som r^4 ,
- er omvendt proportional med rørets længde
- samt er proportional med højden h over udløbsrøret.

Forklaringen får I ikke her og nu. Det er altid rart at have noget godt til gode. Er man interesseret i dette kan Hagen-Poiseuilles lov opsøges. Loven, der giver de sammenhænge, som er nævnt ovenfor, siger at det vand, der løber ud af et rør i tiden Δt er

$$V = \frac{\pi \cdot R^4}{8\eta \cdot L} \cdot (P_2 - P_1) \cdot \Delta t$$

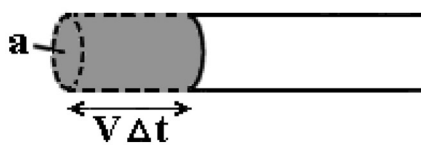
hvor

- R rørets radius
- L rørets længde
- η vands viscositet
- $P_2 - P_1$ Trykforskellen mellem rørets ender, svarende til højdeforskellen mellem rørets ender, hvis der ikke er tilkoblet en pumpe.

Vandstrøm i rør og opstilling af Bernoullis ligning

Vandets hastighed

Vand er ikke til at presse sammen. Volumen af det vand, der løber ind i et rør, er derfor lig det, der løber ud af røret. Det samme gælder for massen af vandet.



Volumen der løber ind eller ud af et rør i tiden Δt er

$$V = a \cdot v \cdot \Delta t$$

hvor a er rørets tværsnitsareal, v er vandets hastighed og Δt er den tid vandet løber i. Massen af dette vand er så

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot a \cdot v \cdot \Delta t$$



Har rørets ender ikke det samme tværsnitsareal fås følgende sammenhæng for vandet der løber ind og ud.

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 && \Leftrightarrow \\ V_1 &= V_2 && \Leftrightarrow \\ a_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t &= a_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t && \Leftrightarrow \\ \frac{a_1}{a_2} &= \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

Dvs. at forholdet mellem vandets ud- og indløbshastighed er givet ved forholdet mellem rørets tværsnitsarealer. Sagt lidt anderledes er hastigheden et vilkårligt sted A i røret bestemt af tværsnitsarealet

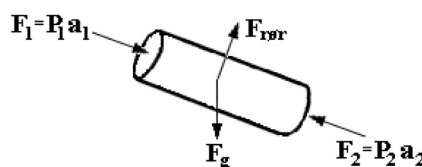
ved stedet A og indgangen samt indgangshastigheden.

$$v_A = \frac{a_{ind}}{a_A} \cdot v_{ind}$$

Har røret den samme diameter overalt er vandets hastighed ens gennem hele røret - også hvis røret har en hældning.

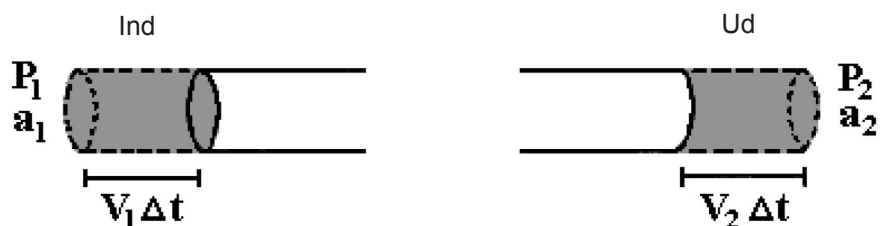
Kraftpåvirkning af vandet

Noget må få vandet til at løbe gennem røret. Dette noget er en kraftpåvirkning af vandet. Kraftpåvirkningen kan skyldes en pumpe eller tyngdekraften alene (vand løber jo gerne "selv" nedad). Sagt helt kort skyldes vandets løb en eventuel ydre trykforskel mellem rørets to ender, samt tyngdekraftens virkning på vandet i røret.



Trykforskel mellem enderne

Trykket uden for rørets ender udfører et arbejde på det vand, der løber ind og ud af røret. Det samlede totale arbejde afhænger af trykforskellen. I tiden Δt løber der lige meget vand ind og ud af røret.



Volumenet er givet ved

$$V = a_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = a_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$$

Arbejdet der udføres på vandet er så ved indløb

$$A_1 = F_1 \cdot s_1 = (P_1 \cdot a_1) \cdot (v_1 \cdot \Delta t)$$

ved udløb

$$A_2 = -F_2 \cdot s_2 = -(P_2 \cdot a_2) \cdot (v_2 \cdot \Delta t)$$

Da vandet, der løber ind og ud, har samme volumen, er det samlede totale arbejde pga. trykforskellen

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 && \Leftrightarrow \\ A &= P_1 \cdot (a_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t) - P_2 \cdot (a_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t) \\ &\Leftrightarrow A = (P_1 - P_2) \cdot V \end{aligned}$$

Højdeforskel mellem enderne

Rørets ender kan være anbragt i forskellige højder h_1 og h_2 . Vandet der løber ind og ud har så forskellig potentiel energi (pga. tyngdekraftens arbejde på vandet i selve røret fra h_1 til h_2). Massen der løber ind og ud af røret i tiden Δt er ens. Derfor er vandets potentielle energi ved enderne henholdsvis

$$E_{pot,1} = m \cdot g \cdot h_1$$

$$E_{pot,2} = m \cdot g \cdot h_2$$

Ændringen i potentiel energi er så

$$\Delta E_{pot} = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

Enders tværsnitsarealer

Rørets tværsnitsarealer ved ind- og udgang har betydning for vandets hastighed. Den kinetiske energi af det ind- og udløbende vand kan derfor være forskellig. Massen m af vandet der løber ind og ud er ens. Ændringen i kinetisk energi er så

$$\Delta E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

Energiregnskabet

Der ophobes ikke energi eller vand i røret. Det arbejde, der udføres på det ind- og udløbende vand, må derfor svare til vandets ændring i potentiel og kinetisk energi.

$$\text{Altså } A = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} \quad \Leftrightarrow$$

$$(P_1 - P_2) \cdot V = \frac{1}{2} m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad \Leftrightarrow$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$\text{hvor } \rho = \frac{m}{V} \text{ er vands massefylde}$$

Dette kaldes også **Bernoullis ligning**. I ord siger den, at vandets energi pr. volumen er konstant overalt i jævnt strømmende vand.

Forsøg med vand

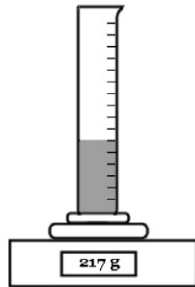
Forsøg 1 Væskers sammentrykkelighed

Formål:

At se om rumfanget presses sammen i en væskesøjle.

Udførelse:

Der bruges et højt måleglas med nøjagtigt afmærkede volumenstreger. Temperaturen holdes konstant (stuetemperatur) under forsøget.



- Hvilke variable skal der måles?
- Mål mindst 7 sæt sammenhørende værdier.

Data:

Variabel symbol	Enhed				

Databehandling:

- Tegn en graf på et stykke mm-papir. Anbring den uafhængige variabel (den variabel du vælger) ud af 1. aksens og den afhængige variabel ud af 2. aksens.
- Hvad viser kurven?
- Kan man ud fra kurven finde en bestemt konstant? – og i så fald
 - hvad fortæller den om væsken?
 - har den et navn?
- Hvordan vil man forvente at kurven ser ud hvis væsken ikke blev presset sammen?
- Hvordan vil man forvente at kurven ser ud hvis væsken blev presset sammen?

Forsøg 2 Vands massefylde

Formål:

At bestemme vands massefylde.

Udførelse:

En stor målekolbe vejes. Kolben fyldes præcis til strengen med vand og vejes igen. Vandets masse findes.

Data

Databehandling:

m_{kolbe}	$m_{\text{kolbe+vand}}$	m_{vand}	V_{kolbe}	ρ
g	g	g	cm ³	g/cm ³

- Beregn vandets massefylde.
- Bestem hvor præcis den fundne værdi er. Gør dette ved at sige at vandets masse er

$$m = m_{\text{målt}} \pm \Delta m$$

hvor Δm er vægtens nøjagtighed 0,01 g eller 0,001 g. Kolbens volumen er

$$V = V_{\text{anført}} \pm \Delta V$$

hvor ΔV skyldes aflæsningsusikkerheden ved strengen. Er denne ± 1 mm fås

$$\Delta V = \pi \cdot r^2 \cdot 0,1 \text{ cm}$$

hvor r er radius af kolbens hals.

Ud fra dette findes

$$\rho = \rho_{\text{målt}} \pm \Delta \rho$$

hvor $\Delta \rho$ er usikkerheden på massefylden.

PS: For andre væsker end vand bør der bruges et pyknometer og en fin vægt ($\pm 0,001$ g). I virkeligheden kan massen m vejes meget nøjagtigt, men der er nogen usikkerhed på volumenet V . Bruges vand som reference fås, at en væskes massefylde er givet ud fra:

$$\frac{\rho_{\text{væske}}}{\rho_{\text{vand}}} = \frac{V \cdot \rho_{\text{væske}}}{V \cdot \rho_{\text{vand}}} = \frac{m_{\text{væske}}}{m_{\text{vand}}}$$

Pyknometeret tørres omhyggeligt af inden vejning, og man skal undgå at komme til at opvarme væsken.

Forsøg 3 Massefyldens temperaturafhængighed

Formål:

At se om vands massefylde afhænger af temperaturen.

Udførelse:

Massefylden ρ bestemmes som i forsøg 2. For at se om temperaturen har betydning bestemmes massefylden ved et par forskellige temperaturer fx ca. 0 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C. Ved temperaturer over 50 °C skal kolben forvarmes med lidt varmt vand så den ikke springer – PAS PÅ SKOLDNING!

Når volumenet passer til kolbens streg, mål så vandets temperatur og vej vandet.

Data:

$m_{kolbe} =$

T	$m_{kolbe+vand}$	m_{vand}	V_{kolbe}	ρ
°C	g	g	cm ³	g/cm ³

Databehandling:

1) Beregn ρ ved de forskellige temperaturer.

2) Afbild ρ som funktion af T på et ark mm-papir og kommenter kurven. Indtegn også tabelværdier fra Databog fysik & kemi.

3) Selvfølgelig udvider beholderens materiale sig lidt, når det opvarmes. Beholderen får derfor et lidt større volumen – dog ikke så meget, at det har nogen virkning af betydning på forsøgets resultater.

Forsøg 4 H₂O molekyler

1) Mærk på noget is - hvordan føles det ?

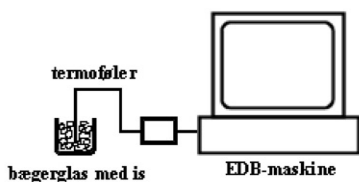


2) Mærk på noget vand - hvordan føles det ?



3) Hvad fortæller 1) og 2) om H₂O molekylnes sammenhæng ?

4) Anbring noget is fra fryseren i et bægerglas. Lad en EDB maskine løbende måle temperaturen og tegne en kurve.



Hvordan forløber kurven ?

Hvad kunne være forklaringen på kurvens form ?

Fortæller kurven noget om H₂O molekylnes sammenhæng ?

5) Kog noget vand i en elkedel uden låg.

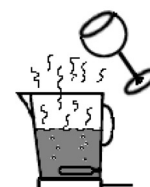
Hvad er det som stiger op?

Pust på det - hvad sker der så? – og hvad fortæller det om H₂O molekylnes sammenhæng ?

6) Hold et glas ind over elkedlen når den koger.

Hvad sker der?

Hvordan føles indersiden af glasset – og er der en forklaring på dette?



Forsøg 5 Varme – opvarmning

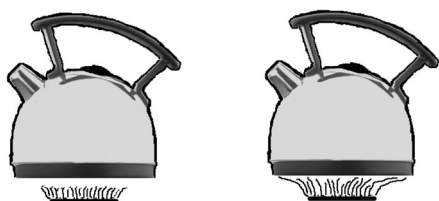
Du skal i det følgende se på begrebet varme – specielt de forhold, der har betydning for begrebet opvarmning, samt selv prøve at opbygge en model hertil.

1) Nævn nogle metoder til opvarmning af vand:



2) Hvordan gør man det i praksis?

3) Hvis du skruer op for et gasblus, hvad sker der så med hensyn til opvarmningen?
– og hvorfor egentlig?



4) Hvis du skruer op for et elkomfur, hvad sker der så med hensyn til opvarmningen?
– og hvorfor egentlig?



5) Hvorfor bliver vandet egentlig varmt på de måder?

6) På bunden af en elkedel står der gerne en række oplysninger.

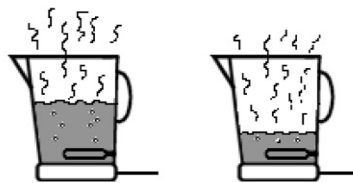
Bl.a. 220/230 V som fortæller, at den kan tilsluttes til et elstik, samt fx blot 2.000 W – hvad betyder det?

Hvis der nu havde stået 1.000 W, hvad ville det så fortælle om virkemåden i forhold til elkanden med 2.000 W?

7) Hvilken form for energi tilføres vand ved opvarmning?

8) Hvilken form for energi tilføres elkedlen i eksemplet ovenfor?

9) I to ens elkander hældes henholdsvis 0,5 kg og 1,0 kg vand, hvorefter kanderne tændes.



I hvilken kande koger vandet først? Hvorfor sker det?

Den ene elkande fyldes nu med 1,5 kg vand. Hvordan går det med opvarmningen af dette vand i forhold til det ovenfor? – og hvorfor mon?

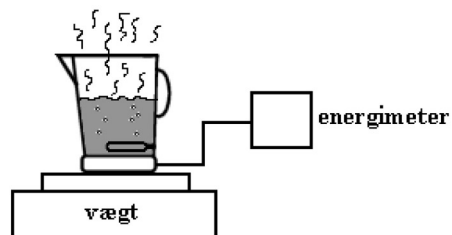
Er der en bestemt sammenhæng mellem energien, der tilføres vandet og massen af vandet – og i så fald hvilken?

10) Hvordan finder man egentlig ud af, om vandet er varmt – evt. ret varmt?

11) Kan man måle sig til, hvor varmt noget vand er – og i så fald med hvad?

12) Kan man måle sig til, hvor meget noget vand er blevet opvarmet efter det kom ud af hanen – og i så fald hvordan?

13) Følg opvarmningen af vand i en elkande. Dvs. mål vandets temperatur og den energi der tilføres



kanden.

Afbild energien E som funktion af temperaturen i et koordinatsystem. Er der en sammenhæng mellem de to variable? – og hvorfor ser kurven mon ud, som den gør, lige efter at elkanden tændes?

Er der en sammenhæng mellem, hvor meget temperaturen er vokset siden begyndelsesforløbet og energien?

Er der fejlkilder i forsøget?

Hvad betyder kanden for opvarmningsforløbet?

14) Kog noget vand. Hæld ca. 150 mL af det i et flamin-gokalorimeter, samt bestem temperaturen og massen af vandet.

Hvor meget koldt vand fra vandhanen skal der hældes i for at blandingstemperaturen bliver 50 °C?

Hvis blandingstemperaturen skulle have været 40 °C, kunne man så have "forudset" hvor meget koldt vand der skulle i? – Prøv!

15) Anbring tre lodder af aluminium, bly og messing i en gryde med kogende vand i 10 minutter. Et lod fiskes op, duppes kvikt af på en serviet og anbringes derpå i et flamingobæger med 300 mL vand.

Mål temperaturen af vandet når den ikke stiger mere.

– Husk at røre lidt rundt før tem-peraturen måles.

Forsøget laves med alle lodderne. Det er vigtigt at der er det samme volumen vand i alle forsøgene – brug et måleglas.



Hvilket lod opvarmer vandet mest, og hvordan kan det være?

Hvilket lod opvarmer vandet mest pr. 100 g lod, og hvordan kan det være?

Loddets materiale			
Loddets masse	i g		
Kalorimeterets masse	i g		
Vandets masse	i g		
Vandets start-temperatur	i °C		
Vandets slut-temperatur	i °C		
Vandets temperatur- stigning	i °C		
Stigningen pr. 100 g lod	i °C		

16) Slå begrebet varmfylde / specifik varmekapacitet op i et leksikon?

17) Kan man ud fra det du har lavet hidtil (opgaverne 1-16) sige noget om, hvilke variable der har betydning for opvarmningen af et stof?

Kan du ud fra disse variable opskrive en formel for energiændringen af et stof, der opvarmes?

Forsøg 6 Varme – fordampning

Du skal i det følgende se på fordampning.

1) Hvad sker der med vand når det fordamper?



2) Ved hvilken temperatur koger vand ved almindeligt lufttryk?

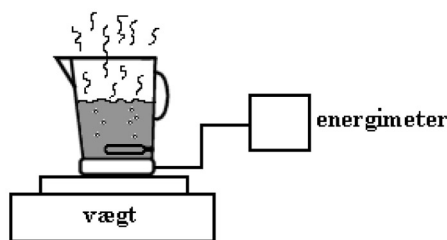
Hvad forstås i øvrigt ved normalt lufttryk i atmosfæren?

Betyder det så, at vand også kan koge ved andre temperaturer?

Fordamper vand kun ved kogepunktet?

3) I det følgende laves et forsøg med fordampning af vand.

Opstilling:



Udførelse:

En elkedel med 1 L vand forbindes med et energimeter. Elkedlen anbringes på en vægt. Når vandet koger følges fordampningen af vand fra elkedlen. Dvs. vægten og energimeteret aflæses for hver gang der er fordampet ca. 5 g vand.

Dette fortsættes der med indtil massen af elkedel med vand er aftaget med 100 g.

Det kan godt være at aflæsningerne skal gå lidt hurtigt undervejs – så vær omhyggelig og vaks.

Måledata:

Masse aflæst på vægten g	Massen af fordampet vand g	Energi aflæst energimeter kJ	Energi afsat i kedel kJ
	0		0

Behandling:

a) Hvorfor bliver der ved med at forsvinde vand fra elkedlen?

- b) Hvilken energiomsætning finder der sted i kanden?
- c) Tegn en kurve med massen af fordampet vand ud ad 1. akse og tilført energi ud ad 2. akse.
- d) Ser der ud til at være en sammenhæng mellem de to variable – massen af vandet, der fordampes og energien, som tilføres?
- e) Er der fejlkilder i forsøget?
- f) Kan man ud fra det, du har lavet, sige hvilke variable og konstanter, der har betydning for fordampningen af vand?
- 4) Slå begrebet fordampningsvarme op i et leksikon.
- 5) Kan du ud fra det, du her har lavet, opskrive en formel for energiændringen af et stof, der fordampes?

Forsøg 7 Varme – smeltning

Du skal i det følgende se på smeltning.

1) Hvad sker der når is smelter?



mellem tilført energi, smeltevarme og isens masse – hvis der er en?

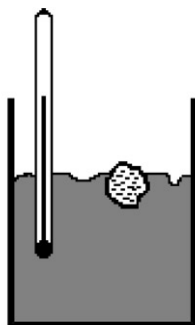
2) Ved hvilken temperatur smelter is?

f) Hvad er temperaturen af smeltevandet lige efter at isen er smeltet?

3) Hvorfor smelter is egentlig i et rum med stuetemperatur 20 °C, men ikke i en fryser med -10 °C?

g) Hvad sker der med temperaturen af smeltevandet senere – set i forhold til temperaturen af vandet der var i flamingobægeret?

4) a) Hvad sker der når en isterning anbringes i et flamingobæger med vand?



h) Hvad sker der med smeltevandets energi? – kan du opskrive et matematisk udtryk for en sådan ændring?

b) Hvilke variable har betydning for forsøget med flamingobægeret?

5) Lav et forsøg hvor isens smeltevarme bestemmes. Det vil sige klarlæg:

c) Hvad sker der med vandets temperatur? – og hvorfor sker dette mon?

a) Hvilke variable skal måles?

b) Hvordan skal forsøget laves?

d) Hvilken slags energi tilføres isen?

c) Hvordan skal beregningen af smeltevarmen laves? – brug at flamingobægeret er varmeisoleret.

e) Slå begrebet smeltevarme op i et leksikon. Kan du ud fra dette opskrive en formel for sammenhængen

d) Er der fejlkilder i forsøget?

e) Hvor godt gik forsøget?

Forsøg 8 Nyttevirkning ved vandopvarmning

Formål

At bestemme energiforbrug og nyttevirkning ved opvarmning af 1L vand fra stuetemperatur til kogepunktet.

$$\text{Nyttevirkning } \eta = \frac{\Delta E_{\text{vand}}}{\Delta E_{\text{brugt}}}$$

Data

Forsøg	a	b	c	d	e	f
vandets masse						
temperatur før opvarmning						
temperatur efter opvarmning						
tilført energi til vandet						
forbrugt energi *)						
nyttevirkning η						

*) Aflæst direkte fra energimeter eller ud fra massen af forbrugt brændsel og brændværdi (se opgave nr. 8)

Udførelse

1L vand afmåles og hældes i den foreskrevne beholder, hvor det opvarmes.

Til opvarmning bruges:

- energimeter, varmeplade og kedel
- energimeter og dyppekoger – evt. i kalorimeter med 200 mL vand
- energimeter og kaffemaskine – her bliver sluttemperaturen mindre end kogepunktet! Find blot η .
- spritblus og gryde – hvor “brænder” med sprit vejes før og efter brug
- gasblus og gryde – hvor gasflaske vejes før og efter brug
- minigrill med trækul og gryde

Databehandling

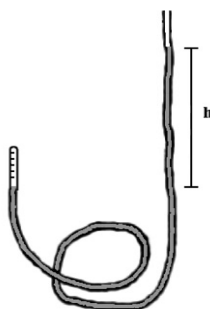
- Beregn den energi, der tilføres for at opvarme 1L vand fra stuetemperatur til kogepunktet.
- Beregn nyttevirkningen.
- Hvilken metode har den bedste udnyttelse af energien – og hvorfor mon?

Forsøg 9 Tryk fra en vandsøjle

Formål

At se på trykket fra en vandsøjle.

Opstilling



Udførelse

Hæld lidt vand i måleglasset/reagensglasset. Fyld vandslangen på 12 m med vand. Sæt delene sammen.

Teori

Hvad bidrager til trykket i måleglasset?

Tryk og søjlehøjde.

Tryk p og $1/V$.

Hvad er tryk fra en vandslange bestemt af?

Hvad siger idealgasloven?

Hvad er søjlehøjden?

Volumen og søjlehøjde.

Atmosfæretryk.

Vacuum.

Behandling

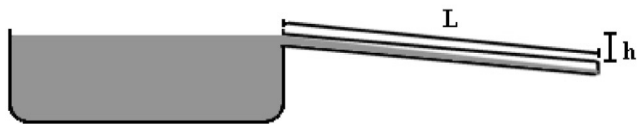
Hvordan kan man måle vandtrykket med de givne remedier? – Prøv, forklar og tegn kurver.

Forsøg 10 Kanalhældning

Formål

At undersøge hvordan vandvolumenet der løber ud pr. tid fra kanalen afhænger af kanalens stigning.

Opstilling



Man kan fristes til at bygge en "akvædukt". Her er brugt en opvaskebalje, en 1m 1x1 cm U-formet aluminiumsliste (om end længere nok var bedre) og lidt LiquiSole (elastisk lim). Resultatet er der selvfølgelig en fysisk grund til.

Udførelse

I forsøget bestemmes hvor lang tid det tager fx $\frac{1}{2}$ L vand at løbe ud for en bestemt værdi af kanalens hældning. Vandhøjden i karret holdes konstant under målingen ved løbende at fylde vand i karret under forsøget. Indløbshøjden til kanalen skal hver gang være den samme. Forsøget laves for en række forskellige hældninger.

Mål kanalens længde en gang for alle, samt faldets højde for hvert forsøg. Brug en spand/andet. Få vandet til at løbe jævnt.

Tap fx $\frac{1}{2}$ L vand når vandet løber jævnt og mål tiden det tager. Opsammel vandet i et bægerglas.

Start med den største stigning – 30 cm på 1 m er ok,

indstil på en ny stigning, osv.

Data

$$V_{\text{vand}} = L$$

$$L_{\text{kanal}} = m$$

Højde h m	Tid t s	Volumen V L	Volumen pr. tid V/t L/s

Databehandling

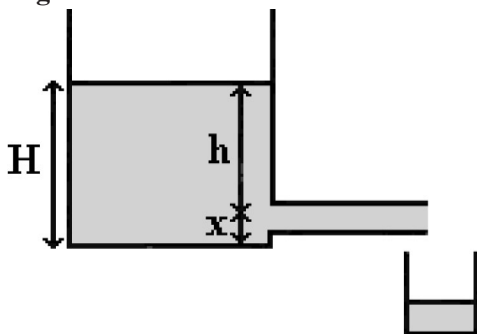
- 1) Hvilken sammenhæng ses der mellem volumen pr. tid og stigningen pr. kanallængde?
- 2) Er Chezy's og Bassin's formel opfyldt?
- 3) Er forudsætningen for Chezy's og Bassin's formel opfyldt?

Forsøg 11 Vandtryk og udløbshastighed

Formål

At undersøge udløbshastighedens afhængighed af væskehøjden over udløbsrøret.

Opstilling



Udførelse

I forsøget undersøges hvor stor en vandmasse, der løber ud af tanken pr. minut for en bestemt værdi af H , vandhøjden over bordet. H holdes konstant under målingen

ved løbende at fylde vand i karet under forsøget. Forsøget laves for en række forskellige værdier af H . Start med de små vandhøjder og hæv så vandoverfladen efterhånden.

Fremgangsmåde

Mål rørets indvendige diameter $d_{\text{rør}}$ med en skydelære. Mål rørets højde x over bordpladen. Vej et 2 L bægerglas – gerne en større beholder. Få vandet til at løbe jævnt ved højden H . Tap vand i 2 minutter når vandet løber jævnt. Opsaml vandet i 2 L bægerglasset. Vej glas med vand. Indstil en ny højde H , osv.

Det kan være bedre at måle volumen af det vand, der løber ud i bægerglasset eller i en større beholder. Brug et stort måleglas hertil. En anden mulighed er at måle massen af $\frac{1}{2}$ L vand og så blot tage tid på udløbet af $\frac{1}{2}$ L vand.

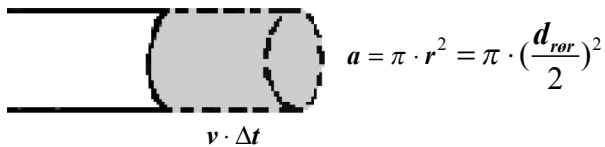
Data

$m_{\text{glas}} =$ $d_{\text{rør}} =$ $x =$

H cm	h cm	$m_{\text{glas+vand}}$ g	m_{vand} g	$m_{\text{vand pr. min}}$ g/min
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				

Databehandling

1) Tegn $m_{\text{vand pr. min}}$ som funktion af \sqrt{h} .
 Man kan i stedet tegne $V/\Delta t$ som funktion af \sqrt{h} .
 Hvilken sammenhæng ses?



2) Volumen af vand der løber ud i tiden Δt er

$$V = a \cdot v \cdot \Delta t = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{rør}}}{2}\right)^2 \cdot v \cdot \Delta t$$

Volumenet der løber ud pr. tid er

$$\frac{V}{\Delta t} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{rør}}}{2}\right)^2 \cdot v$$

For det lige tykke vandrette rør er

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

så for dette rør fås

$$\frac{V}{\Delta t} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{rør}}}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot \sqrt{h}$$

For det vand der løber ud pr. minut gælder

$$m_{\text{vand pr. min}} = \rho \cdot \frac{V}{\Delta t}$$

hvor ρ er vands massefylde.

a) Hvilken sammenhæng er der mellem $\frac{V}{\Delta t}$ og \sqrt{h} ?

– eller mellem m og \sqrt{h} ?

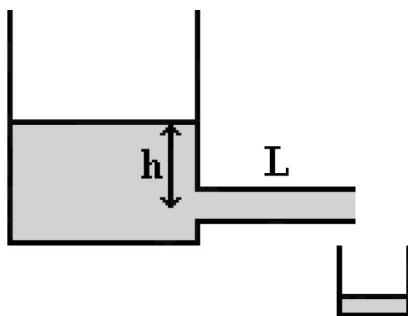
b) Stemmer dette med det fundne (se evt. side 17)?

Forsøg 12 Hastighed og rørradius

Formål

At undersøge udløbshastighedens afhængighed af rørets radius.

Opstilling



Udførelse

I forsøget undersøges hvor stor en vandmasse, der løber ud af tanken pr. minut for en bestemt rørradius.

Vandhøjden H over bordet holdes konstant, $h = 10$ cm.
 Rørenes længde L er ens.

Fremgangsmåde

Mål rørets indvendige diameter $d_{\text{rør}}$ med en skydelære og find radius r . Vej et 2 L bægerglas – gerne en større beholder. Få vandet til at løbe jævnt.

Tap vand i 2 minutter når vandet løber jævnt. Opsaml vandet i 2 L bægerglasset. Vej glas med vand. Skift til et nyt rør, osv.

Det kan være bedre at måle volumen af det vand, der løber ud i bægerglasset. Brug et stort måleglas hertil. En anden mulighed er at måle massen af $\frac{1}{2}$ L vand og så blot tage tid på udløbet af $\frac{1}{2}$ L vand.

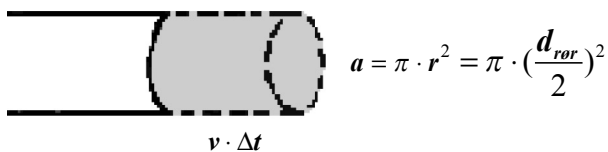
Data

$m_{\text{glas}} =$ $L =$ $h =$

r cm	$m_{\text{glas+vand}}$ g	m_{vand} g	$m_{\text{vand pr. min}}$ g

Databehandling

1) Afbild på dobbeltlogaritmisk papir $m_{\text{vand pr. min}}$ – eller $V/\Delta t$ – som funktion af radius r .



2) Volumenet af vand, der løber ud i tiden Δt er

$$V = a \cdot v \cdot \Delta t = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{rør}}}{2}\right)^2 \cdot v \cdot \Delta t$$

Volumenet der løber ud pr. tid er

$$\frac{V}{\Delta t} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{rør}}}{2}\right)^2 \cdot v$$

For det lige tykke rør er

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

så for dette rør fås

$$\frac{V}{\Delta t} = \pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \sqrt{h}$$

For det vand, der løber ud pr. minut gælder

$$m_{\text{vand pr. min}} = \rho \cdot \frac{V}{\Delta t}$$

hvor ρ er vands massefylde.

a) Hvilken sammenhæng er der mellem $\frac{V}{\Delta t}$ og r^2 – eller mellem m og r^2 ?

b) Hvordan stemmer det med det oplyste (se evt. side 17)?

Forsøg 13 Hastighed og rørlængden

Formål

At undersøge udløbshastighedens afhængighed af rørets længde.

Udførelse

Forsøget laves som forsøg 12. Her er det blot rørets længde der varieres. Rørets radius holdes konstant.

Databehandling

1) Afbild $m_{\text{vand pr. min}}$ som funktion af $1/L$ – eller $V/\Delta t$ som funktion af $1/L$.

2) Hvordan stemmer det med det oplyste?

Data

$m_{\text{glas}} =$

$r =$

$h =$

L	$m_{\text{glas+vand}}$	m_{vand}	$m_{\text{vand pr. min}}$
cm	g	g	g

Opgaver

Lidt om romere og vand & Romernes bade

Opgave 1 – Spørgsmål til teksten

Hvordan skaffede romerne sig vand i en by?
Hvad skaber behov for tilførsel af vand udefra til en by?
Hvad mente en romer ved begrebet en by?
Hvordan definerer vi egentlig begrebet en by i Danmark?
Hvad ligner romernes begreb om en by i samfundets struktur i Danmark?

Hvad blev vandet brugt til dengang?
Hvordan fik den almindelige borger vand?

Hvem administrerede vandnettet – og hvorfor?
Fungerede det upåklageligt?
Hvordan var vandnettet opbygget generelt?
 hvordan blev vandet opsamlet?
 hvordan blev vandet rensat?
 hvordan blev vandet transporteret til byen?
 hvordan kom man af med det igen?
 hvorfor skal akvædukter have en hvis højde inde ved byen?

Hvad er en akvædukt?
 hvordan er dens forløb ind mod byen?
 hvorfor løber vandet igennem kanalen?
 hvordan med højderygge og dale?
 sker der en teknisk udvikling af akvædukter – og hvis hvordan viser den sig?
Hvor hentes ideer til akvædukter fra?

Hvad forstås ved et romersk bad (thermeanlæg)?
Hvorfor talte læger græsk?

Om Rom

Hvor mange akvædukter er der?
Bygges akvædukterne på “en gang”?
Hvor hentes vandet fra og hvilken slags vand er det?
Hvor meget vand hentes i alt?
Hvilken akvædukt er den længste?
Hvilken akvædukt er den mest vandrige?
Hvor stor en del af akvædukter er over jorden?

Byen Roms vandforsyning

Opgave 2 – Gromaen

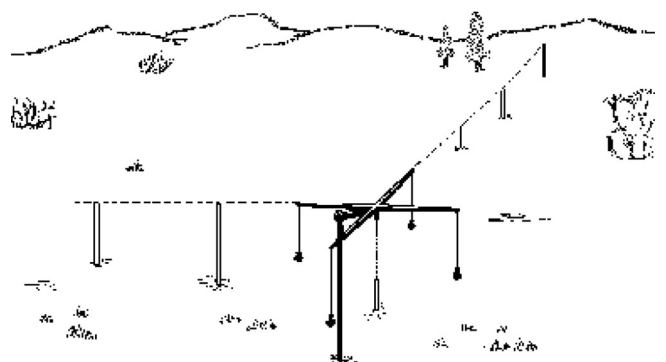
Gromaen var det instrument, som landmålere brugte til at udstikke rette vinkler i landskabet. Som det ses på figuren bestod det af en lodret stang, der kunne sættes fast i jorden. På stokken sidder der en arm, der bærer et vandret kryds af to stænger sat vinkelret på hinanden. Desuden er hver arm forsynet med en lodsnor.



Retningen ud i landskabet blev lagt ved at sigte fra gromaen ud til stokke sat op i landskabet (se figur).

- Hvorfor sidder der en arm på stokken?
- Hvad kan forstyrre brug af gromaen?

Antag at gromaen skulle bruges til måling af stigninger i landskabet.



- Hvordan kan stigninger i landskabet bestemmes ved hjælp af gromaen? Svaret ses ud fra figuren.
- Hvordan ville du bruge den til at bestemme faldet på en vandledning?
- Hvor lidt “slør” må der være i apparatet for at have en fejl under 2 cm på 1 km? Længden af stængerne i krydset er ca. 1,8 m.

En sådan nøjagtighed er lidt meget at kræve af gromaen. Romerne brugte faktisk et andet instrument, *chorabaten*, til nivellering.

Opgave 3 – Nivellering

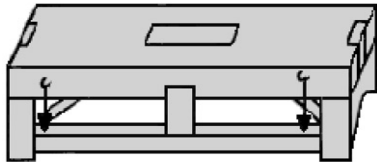
Ved bygningen af en akvædukt har det været nødvendigt, at vide noget om højdeforskellen mellem kildeområdet og hovedfordelingstanken. Desuden måtte man have et nøje kendskab til landskabet der lå imellem. Derefter har man så kunnet se på, hvilke bygningsmæssige krav en linieføring indebar, samt hvor enkel den har været at vedligeholde i det daglige. Ud fra dette og sikkert mere har man så valgt linieføringen.

Ved opmålingen af landskabet har det været nødvendigt med et apparat til måling af højdeforskel og stigningsgrad. Når akvædukten blev bygget har man også haft behov for det samme apparat. Man måtte sikre sig, at faldet var stort nok til, at vandet fik en tilfredsstillende hastighed.

Faldet fra kilder til hovedfordelingstanken er ikke delt jævnt ud over akvæduktens længde. Stigningsgraden har varieret meget, fx fra 20 cm pr. km (0,02 %) til 163 m pr. km (16,3 %). Tallene er målt i akvædukter ved Rom.

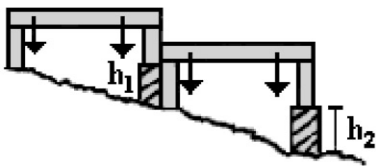
Variation af stigningsgraden i de åbne kanaler ses også brugt til at regulere vandets hastighed ind mod forsyningsstedet.

Her lidt om apparatet – *chorobaten*, som man regner med er brugt ved akvædukter. Chorobaten består af en 6 m lang bjælke på to ben. Benene er forstærkede og 60 cm høje. Midt på bjælken er der en 1,5 m lang vandrende. På bjælken er der fastsat lodsnore. Ved hjælp af dette kan den indstilles vandret.



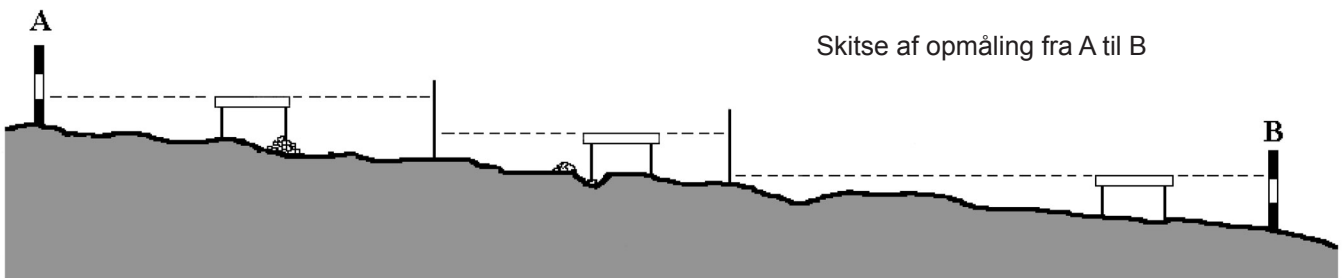
Skitse af en chorobat

Om der har været anbragt sigtekorn eller om man ved brugen har set langs bjælken ved man ikke noget sikkert om. Den menes brugt på følgende måde.



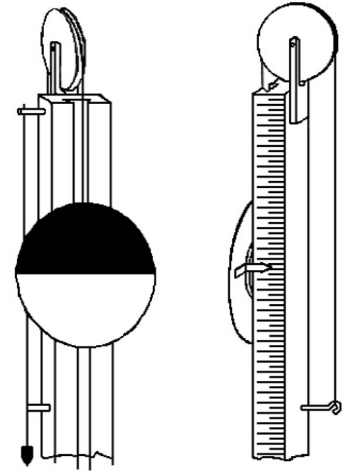
Chorobaten klodses op, så den står vandret. Tilvæksten i højden er så givet ved

klodsernes højde. Hvordan den egentlig er brugt vides ikke.



Skitse af opmåling fra A til B

Noget tyder dog på at romerne også har brugt en sigteplet. Selve pletten er todelt og kan hæves og sænkes af en assistent for den person som sigter langs chorobaten.



Brugen af denne sammen med chorobaten er skitseret

nederst på siden. Med sådan en opstilling kan der opnås en rimelig nøjagtighed ved at sigte over længere afstande. Trods chorobaten har man på den måde haft et godt anvendeligt apparat.

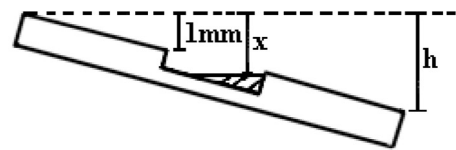
a) Angiv hvordan stigninger i landskabet kan bestemmes med chorobaten.

b) Hvor lidt unøjagtighed må der være ved apparatets opstilling for at have en fejl under 2 cm på 1 km?



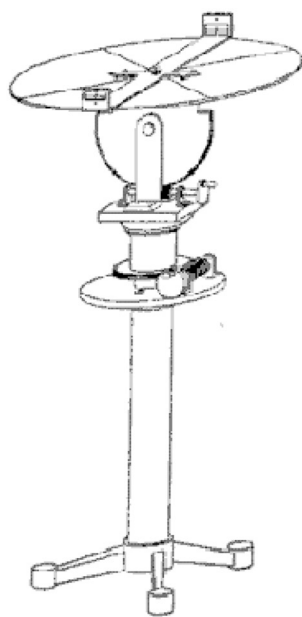
Apparates længde i forhold til vandrendens længde kan skyldes, at dette har gjort indstillingen enklere.

c) Apparatet står nu skråt. Den højeste kant af vandrenden er 1 mm under sin vandrette stilling. Find stykket h som bjælken skal løftes.



d) Hvor langt et stykke x er der fra vandoverfladen op til det vandrette niveau?

Opgave 4 – Herons apparatur

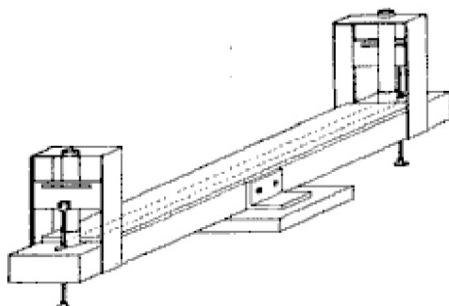


Heron udviklede et apparat, *dioptraen*, der kunne udføre flere arbejdsopgaver. Der er dog tvivl om, at apparatet har været særligt udbredt, da det formodentligt har været et ret dyrt apparat at lave. I instrumentet bruges "skrue uden ende" til at styre drejningen både om en vandret akse og en lodret akse.

Apparatet ses som teodolit i figuren. Teodoliten kunne bruges til at udlægge vinkelrette linier i landskabet, men også til afstandsbedømmelse.

Overdelen kunne udskiftes, så det blev et nivelleringsinstrument. Her blev den vandrette linie bestemt ved vandhøjderne i to lodretstående glasrør, der var forbundet med hinanden over en afstand på godt 1,5 m.

Det ses her på apparatet anvendt som teodolit for at bestemme bredden af en flod.

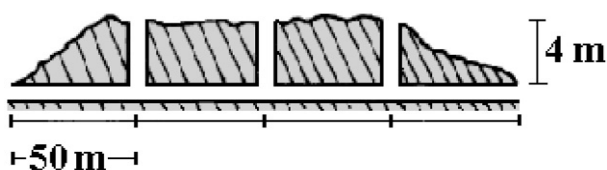


Apparatet anbringes to steder på den ene bred med 50 m i afstand. Der måles to vinkler $a = 30^\circ$ og $b = 32^\circ$ til et bestemt punkt på den anden bred.

Hvor bred er floden?

Opgave 5 – Arbejdstid

En akvædukt skal føres gennem en højderyg.



I selve kanalen er der kun plads til, at en mand kan grave/hugge. Gravehastigheden varierer men lad os sige den er $v = 1$ m/dag.

a) Hvor lang tid tager det at grave kanalen, hvis der startes i begge ender samtidigt?

For hver 50 m forsynes kanalen med mandehuller. Når et sådant er gravet, graves ud til begge sider.

b) Hvor lang tid tager det at grave kanalen på denne måde?

Opgave 6 – Stigningsgrad

Akvædukten Aqua Anio Vetus falder ialt 200 m på ca 64 km.

Find stigningsgraden i %.

Om forsøg med vand

Opgave 7 – Vands varmfylde

Find en tabel med vands varmfylde (fx side 38 i Håndbog for fysik og kemi).

a) Beregn ud fra tabellen hvor meget energi, der skal til for at opvarme 1 kg vand fra 0°C til 100°C .

b) Beregn også den energi, der skal bruges hvis der anvendes værdien $c_v = 4.182 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{grad})$ ved 20°C .

c) Find størrelsen af den fejl der er ved at bruge $c_v = 4.182 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{grad})$. Angiv afvigelsen i %.

Opgave 8 – Brændværdier

I denne opgave ses på hvor meget brændsel, der skal bruges for at opvarme 1 kg vand fra 15°C til 100°C .

a) Beregn den energi som skal bruges.

Følgende tabel viser brændværdier for forskellig slags brændsel.

Brændsel	Brændværdi i MJ/kg
stenkul	29,3
tørv	13,4
tørt træ	14,5
olie	42,0
spiritus (95%)	25,3
naturgas	48,6
olivenolie	36
trækul	22,2

b) Beregn massen der mindst skal bruges til opvarmningen for hver slags brændsel.

Opgave 9 – Suppekogning

Hvor meget træ skal der bruges for at opvarme 5 L suppe, der er frosset ned, fra 0 °C til 100 °C?

Suppens massefylde er 1,00 kg/L.

Suppens varmekapacitet er 4.182 J/(kg·grad).

Suppens smeltevarme er 334 kJ/kg.

Opgave 10 – Vaskevand

Lad os antage at en familie på 4 personer i dag bruger 200 L varmt vand med $t = 40$ °C pr. dag.

a) Vandet er 10 °C når det løber ind i huset. Hvor meget energi skal der bruges til opvarmningen?

b) Antag opvarmningen sker med forbrænding af træ. Hvor mange kg træ skal der bruges pr. dag?

Tørt træ har i gennemsnit massefylden ca. 700 kg/m³.

c) Antag familien kun bruger træ som energikilde. Hvor mange kubikmeter træ skal der bruges på 1 år til vandopvarmning?

Opgave 11 – Hjemmeopgave om et nymodens bad

En person der går i brusebad bliver jo gerne ren af det, men bruger også vand og nyttig energi. Om det handler denne opgave.

a) Overvej hvordan man kan finde ud af hvor meget vand man normalt bruger til et bad. Beskriv hvordan det kan gøres og find ud af hvor meget vand det er.

b) Hvor varmt er vandet under et bad? – og hvor varmt er vandet egentlig når det kommer ind i huset? Beregn hvor meget energi der skal til for at varme vandet op.

c) Hvor kommer energien til at opvarme vandet fra – og hvilken slags energi er det?

d) Find ud fra følgende brændværdier ud af, hvor meget "brændsel" der skal bruges.

Brændsel	Brændværdi
olie	42,3 MJ/kg
naturgas	48,6 MJ/kg
kul	28 MJ/kg
træ	14 MJ/kg

e) Find evt ud af hvad et bad koster?

Opgave 12 – Træforbrug

Danmarks energiforbrug var i 2000 ca. $820 \cdot 10^{15}$ J.

Hvor mange kubikmeter træ skal der bruges for at dække et sådant forbrug?

Man kan også overveje hvor lang en 1 m høj og 1 m bred brændestabel med dette træ bliver.

Naturligvis har der ikke været et så stort energiforbrug pr. person i et lavteknologisk samfund som det romerske rige. Man regner dog med, at fyring med træ har været den væsentligste årsag til at skovene dengang forsvandt i sydeuropa.

Opgave 13 – Trykket fra en vandsøjle

a) Tegn en kurve, der viser en vandsøjles tryk som funktion af højden. Lad højden variere fra 0 til 10 m.

b) Find den vandhøjde, der svarer til et tryk på 1 atm.

Opgave 14 – Varm luft

I Romernes bade udnyttede de, at varm luft stiger opad. Dette og bygningen af specielle kanalsystemer gjorde det muligt at opvarme gulve og væge i svederum og saunaer.

Her ses på, hvorfor varm luft stiger opad. Atmosfærisk luft har molmassen 28,96 g/mol.

a) Find vha. idealgasloven hvor meget 1 mol atmosfærisk luft fylder ved 20 °C og 60 °C når trykket $p = 1$ atm.

b) Beregn massefylden for luften ved de to temperaturer.

Man ser her, at 1 mol luft har den samme masse ved de to temperaturer, men vidt forskellig rumfang og dermed massefylde ρ .

Lad os nu se på en ballon med varm luft. Udenom ballonen er trykket stort set 1 atm. Ses nøjere efter stemmer dette ikke helt. Trykket aftager jo med højden, da trykket er skabt af den luftsøjle, der er ovenover – sådan da. Dvs. trykket ovenover og nedenunder ballonen er lidt forskellige. Trykket ovenover er lidt mindre end det nedenunder. Forskellen er trykket, der kommer fra en luftsøjle med ballonens højde.



Da trykket er indført som $P = F/a$ vil det sige, at ballonen er påvirket af en kraft opad. Denne kraft svarer til tyngdekraftens størrelse på luften, der er trængt væk af ballonen

$$F_{op} = m_{luft\ fortrængt} \cdot g$$

Nu har luften/gassen i ballonen jo også en masse. Tyngdekraften på denne er

$$F_{ned} = m_{luft\ i\ ballon} \cdot g$$

Den kraft der trækker ballonen op er forskellen mellem disse to kræfter

$$\Delta F = F_{op} - F_{ned} = (m_{luft\ fortrængt} - m_{luft\ i\ ballon}) \cdot g$$

En varmluftballon har radius 10 m, dvs. dens volumen er $V = 4/3 \pi \cdot r^3 = 4.189 \text{ m}^3$. Trykket i ballonen er 1 atm.

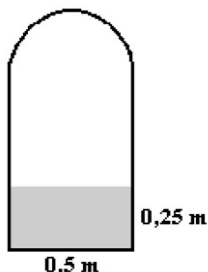
- Find massen af luft ved 20°C og volumen 4.189 m³.
- Find den vægt ballonen kan løfte, hvis luften i ballone er 60 °C. Ballonen vejer selv 90 kg.

Vandstrøm i kanaler

Opgave 15 – Vandgennemløb i en kanal

Der ses på kanalen i figuren.

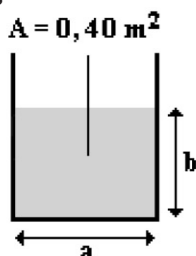
- Brug Chezy og Bazin's formel til at finde vandets gennemsnitlige hastighed. Konstanten $c = 60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ og kanalen falder med 0,58 m på 1000 m.



- Hvor meget vand løber der igennem på 1 s?
- Nu fordobles vandhøjden i kanalen. Hvad er vandets gennemsnitlige hastighed nu?
- Fordobles vandmængden der løber igennem når vandhøjden fordobles? – begrund svaret.

Opgave 16 – Gnidning og hastighed

Vandets gnidning mod kanalens overflade afhænger af hvor stor en berøringsflade vandet har med kanalen. Det vil sige, at ser vi på en kanal, hvor vandet har et bestemt tværsnitsareal A ,



så er gnidningen mindst mulig hvis længden af siden, vandet har ind mod kanalen, er mindst mulig. Opgaven her går ud på at bestemme forholdet mellem vandhøjden a og bredden b når dette er opfyldt.

- Hvad er tværsnitsarealet A udtrykt ved a og b ?
- Hvad er længden af vandets side mod kanalen udtryk ved a og b ?
- Når arealet A er konstant. Hvad er så forholdet mellem a og b når længden af vandets side mod kanalen skal være mindst mulig?

Opgave 17 – Transporttid

Akvædukten Anio Novus ved Rom har en længde på 86,8 km. Lad os sige at vandet har hastigheden 0,9 m/s hele vejen igennem.

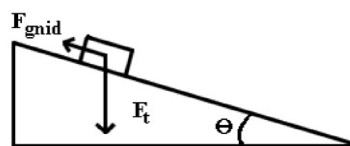
Hvor lang tid er vandet undervejs til byen?

Opgave 18 – Chezy's og Bazin's formel

Med hensyn til Chezy's og Bazin's formel kunne man spørge, hvad der ville ske, hvis gnidningen ikke lige svarede til tabet i potentiel energi!

- Hvad ville der ske med vandets hastighed når kanalen blev mere stejl?
- Hvad ville der ske hvis vandet kom fra en stejlere til en mindre stejl del af kanalen – så hastigheden var for stor?

Fysisk ville det betyde at den resulterende kraft F_{res} som virkede på et lille vandvolumen i kanalen ikke var nul.



Af den lille figur ses

$$F_{res} = F_t \cdot \sin(\Theta) - F_{gnid}$$

Dette svarer til at se vandets bevægelse i kanalen meget forenklet som en glidende bevægelse på et skråplan.

$$\text{Er } F_{gnid} = k \cdot B \cdot v^2$$

hvor B er vandets berøringsareal med kanalen (se side 15), fås integralligningen

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot \sin(\Theta) - k \cdot B \cdot v^2 \quad \Rightarrow$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin(\Theta) - k \cdot B \cdot v^2 \quad \Rightarrow$$

$$\int \frac{m}{m \cdot g \cdot \sin(\Theta) - k \cdot B \cdot v^2} dv = \int dt \quad \Rightarrow$$

$$\int \frac{1}{v^2 - \frac{m \cdot g \cdot \sin(\Theta)}{k \cdot B}} dv = -\frac{k \cdot B}{m} \int dt$$

En stamfunktion til

$$f'(x) = \frac{1}{x^2 - d^2} \quad \text{er} \quad f(x) = \frac{1}{2d} \ln\left(\frac{x-d}{x+d}\right) \cdot C$$

– prøv evt selv efter.

Bruges dette og sættes $d = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot \sin(\Theta)}{k \cdot B}}$ fås følgende:

$$\frac{1}{2d} \ln\left(\frac{v-d}{v+d}\right) = -\frac{k \cdot B}{m} t + C_1 \quad \Rightarrow$$

$$\ln\left(\frac{v-d}{v+d}\right) = -\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{v-d}{v+d} = e^{-\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2} \quad \Rightarrow$$

$$v-d = (v+d) \cdot e^{-\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2} \quad \Rightarrow$$

$$v(1 - e^{-\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2}) = d(1 + e^{-\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2}) \quad \Rightarrow$$

$$v = d \frac{1 + e^{-\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2}}{1 - e^{-\frac{2d \cdot k \cdot B}{m} t + C_2}}$$

af dette udtryk ses at $v \rightarrow d$ for tiden $t \rightarrow \infty$.

Vandets hastighed vil altså efterhånden nærme sig

$$v = \frac{m \cdot g \cdot \sin(\Theta)}{k \cdot B} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{k} \frac{a \cdot b}{2a+b}} \sin(\Theta)$$

den hastighed hvor $F_{\text{res}} = 0$ – svarende til Chezy og Byzin's formel, se side 14 og 15.

Når vandet løber jævnt gennem hele kanalen, så er volumenet der løber gennem et tværsnit af kanalen i løbet af 1 s det samme.

c) Hvis dette ikke var tilfældet, hvad ville der så ske?

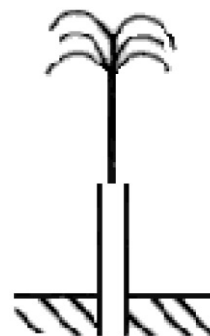
d) Hvordan vil vandhøjden være ét sted i kanalen sammenlignet med et andet sted i kanalen, hvor kanalens "fald" er større? – forudsat kanalen ellers har ens form overalt.

Højere _____ Ens _____ Lavere _____ Sæt X

Vandstrøm gennem et rør

Opgave 19 – Den artesiske brønd

Når vandledende lag ligger tæt ved overfladen, kan vandet bryde frem som en kilde. Nogle gange er vandet under et sådant tryk, at der med lidt snilde kan laves en artesiske brønd/fontæne.



For nogle år siden gik det galt for en brøndborer ved Vejle. En boring løb løbsk. På grund af det artesiske tryk kom der en kilde som leverede ca 70 m³ vand pr. døgn – i en have, hvilket var knap så heldigt.

Et sted springer vandet 1 m op fra et rør, der rager 1 m op over overfladen og når 1 m ned i jorden. I det følgende kan du fx vælge 0-punkt for den potentielle energi ved jordoverfladen.

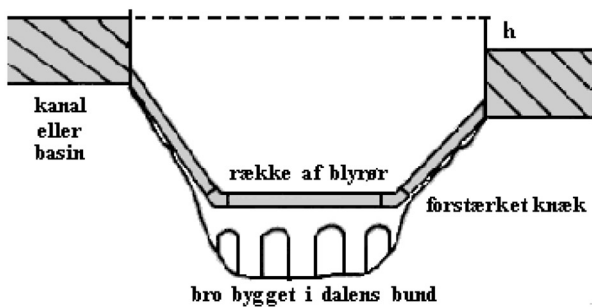
- Hvad er den potentielle energi af 1 kg vand ved rørets munding?
- Hvad er den potentielle energi af 1 kg vand ved rørets indgang?
- Hvad er den potentielle energi af 1 kg vand i strålen top?
- Hvad er vandets hastighed ved rørets munding (der ses bort fra luftmodstand)?
- Hvad er trykforskellen $p_2 - p_1$ mellem vandet i undergrunden og rørets munding? – Vandets hastighed i røret er konstant og i undergrunden ca. 0 m/s. Brug Bernoullis ligning.

Opgave 20 – Trykledning over dale

Romerne vidste, at man kan føre vand over dale i trykledninger. Man mener, at teknikken kan stamme fra Lilleasien fra hellenistisk tid. Man er dog ikke stødt på denne teknik ved Roms akvædukter. Romerne byggede sådanne trykledninger over dale, men brugte dog oftest at bygge broer.

En forklaring på dette kan være, at broer har været den enkleste løsning. Det var ikke ualmindeligt, at en kanal havde et vandfyldt tværsnit på 3 m². Skulle denne vandmængde føres over i blyrør, kan det have været en for omstændelig løsning.

Teknikken ses anvendt ved mindre vandrige akvædukter.



Opgave 21 – Vandfordelingstanken

I byerne blev vand fra hovedvandledninger ført til fordelingstanke. Det der også inde i byerne drev vandet frem var tyngdekraftens virkning på vandet i rørsystemet.

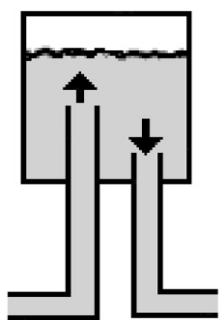
Her en skitse af en vandfordelingstank tilsluttet en højtliggende akvædukt.

Det var kendt, at vandet ville stige op til den samme højde ved udløbet, som det havde ved indløbet. Rørene ydede en vis modstand mod vandets bevægelse. Så for at sikre en tilpas gennemløbshastighed skulle udløbet ligge et stykke h under indløbet. Dette giver et højdetab, som gerne er større end hvis, der var bygget en bro.

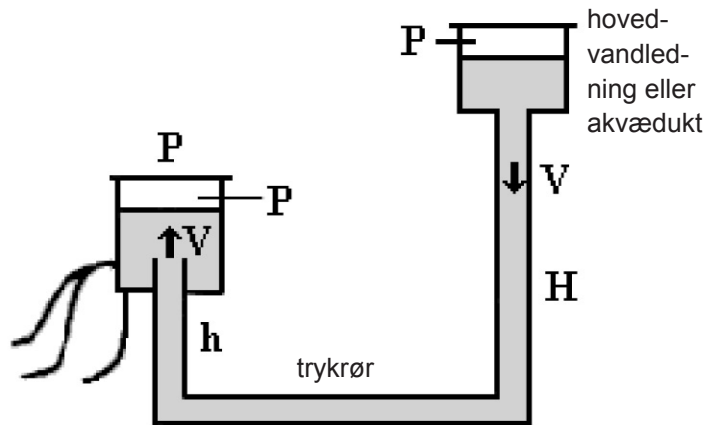
Et eksempel på sådan en trykledning findes ved Beaunant nær Lyon i Frankrig. Her krydses en dal, der er 140 m dyb, af ni rækker blyrør. I bunden er en bro med en højde på op til 17 m. Dalen er 2,6 km bred.

- Find trykket i røret på broen. Beregn det ud fra vandsøjleens højde.
- Lad os gætte på at rørene sænker vandets energi med 12,5 J pr. kg. Find størrelsen af højdetabet h som skal overvinde dette energitab.

Trykket i rørene er ikke kun afhængig af vandhøjden over rørene. Rørene udsættes også for trykændringer, når vandets gennemløbshastighed ændres ved fx åbning og lukning for vandet. Disse trykændringer kan give stødpåvirkninger, som kan sprænge røret.



Dette kan forhindres ved at dele ledningen op i flere dele. Med mellemrum førtes rørene op på højde med vandets udgangsniveau (tilpasset rørenes modstand). Dette blev gjort i tårne med et vandkammer foroven. Eventuelle trykstød kunne så opfanges her uden at der opstod skade.



Højden h op til vandfordelingstanken var gerne ca. 6 m. Højden af hovedvandledningen er $H = 20$ m, hvilket ikke var usædvanligt.

Vandet løber hele tiden igennem forbindelsesrøret. Dvs. vandhastigheden v er konstant og ens i hele røret.

Vi ser bort fra, at noget af vandets energi omsættes til termisk energi i selve forbindelsesrøret.

- Find E_{pot} for 1 kg vand i akvædukten og i fordelings-tanken.
- Find hastigheden af 1 kg vand i forbindelsesrøret.
- Se på Bernouille's ligning og find et udtryk for vandets hastighed i røret.

Fra fordelingstanken fører der stikledninger ud til forbrugere. Stikledninger skulle være anbragt i samme højde over tankens bund for at sikre en ensartet vandforsyning.

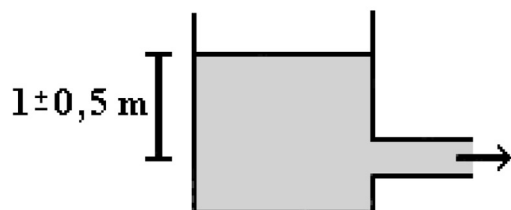
Frontinus skriver, at tankene skulle lette tilslutning og reparation af forbrugerrør, samt mindske generingen af hovedkanalen. Tanken har desuden kunnet sikre, at vandet ikke blev leveret med for stor hastighed til forbrugere. Et problem der kunne være opstået nogle steder hvis vandet kom fra hovedkanalen.

- Lad os sige, at vandet ved forbrugeren løber ud i højden 1 m. For enkelhedens skyld antages, at vandoverfladen er lige over rørenes indløb. Find vandets udløbshastighed.

Tanken måtte tilføres og levere et ens volumen vand. Ellers løb den tør eller over. Romerne kendte ikke noget til lukning for vand med svømmerteknik, men der kan have været et overløbsrør, der ledte overskudsvand til en kloak eller andet.

Tanken var lavet sådan, at der stod et vist vandreservoir i den. Den skulle kunne klare små svingninger i vandhøjden.

e) Lad os sige, at vandhøjden over rørene ud fra tanken er 1 m. Lad os gætte på, at vandhøjden har kunnet svinge med 0,5 m til hver side af højden 1 m.



Find den største og den mindste hastighed vandet kan have ved forbrugeren.

Opgave 22 – Rør

Romerne lavede rør af bly. Rørene blev lavet ud fra blyplader. Disse blev støbt ca. 3 m lange, hvorimod bredden varierede alt efter, hvor stort røret skulle være. Pladerne blev foldet og så loddet sammen. Faconnen var derfor ikke rund, men lidt aflang.



Vandet, der kom til Rom, var og er ret hårdt. I nye rør dannedes derfor hurtigt et overtrækslag af blycarbonat og meget kalk. Man regner med, at det var nødvendigt at skifte rørene ud med nogle års mellemrum, fordi de simpelthen kalkede til.

Hvor meget vand der løber ud af et rør pr. tid afhænger af rørets åbning og vandets hastighed.

Romerne kunne ikke direkte måle hastigheden. De kunne dog bruge et solur og finde udløbets volumen pr. døgn.

Her er nogle eksempler på tal nævnt af Frontinus.

Navn på rør	Rørdiameter i cm	Kapacitet i m ³ /døgn	Vandets hastighed i m/s
5-røret	2,3	40	
6-røret	2,8	57,5	
8-røret	3,7	102,4	
10-røret	4,6	160	
15-røret	6,9	360	
20-røret	9,3	640	
40-røret	13,2	1.303	

Find vandets hastigheder i m/s.

Opgaver beregnet på en evt. studietur

Følgende opgaver har været brugt på studieture til Rom.

Ideen med disse opgaver er at eleverne deles i passende små hold, der hver især står for fortællingen på det aktuelle sted.

Generelt fungerer rolige steder udmærket, men også mere trafikerede steder som ved Porta Maggiore kan det fungere. Eleverne går også gerne godt til den.

Hvor hvad gøres må selvfølgelig tilpasses forløbet af turen, samt hvad man nu besøger mht. Caracallas Thermer, Ostia, Pompeji ...

Ud over de her givne referencer kan andet materiale bruges med fordel, fx Jørgen Ortmanns "Til Rom med naturfag", cd'en "Nye veje til Rom" samt diverse leksika. Et besøg i historiekollegernes bibliotek bør man ikke snyde sig selv for - gerne ledsaget.

Indvinding af vand til akvædukterne

Herunder ønskes følgende:

- omtal lidt om krav til indvindingstedet
- omtal hvordan romerne samlede deres vand ind

Se kun på opsamlingen – rensningen tager en anden sig af.

På museet Civiltà Romana er der en model af et sted, hvor vandet indvindes.

- Find det og vis det frem, hvis vi kommer dertil.

Selve foredraget vil nok ske på Casale di Roma Vecchia.

Materiale:

Roms vandforsyning side 10 – 11
Roms akvædukter side 42 – 49

Rensning af vand fra indvindingsstedet

Her ønskes en omtale af følgende:

- hvordan rensningsstedet kan være opbygget vis evt en tegning, samt
- hvordan systemet virker

På museet Civiltà Romana er der en model af et anlæg hvor vandet renses.

- Find den og omtal den, hvis vi kommer derud.

Selve foredraget vil nok ske på Casale di Roma Vecchia.

Materiale:

Roms vandforsyning side 10 – 11
Roms akvædukter side 58 – 61

Generelt om akvædukter

Når de andre har fortalt om stedet ved Casale di Roma Vecchia, så omtaler I følgende:

- Hvad betød højden af akvædukten inde i Rom?
- Er en akvædukt altid anbragt på buer?
- Hvad drev vandet frem og hvordan blev det styret/fastlagt?
- Hvad gjorde at vandet ikke bare sivede ud af kanalens murværk?
- Hvordan var akvædukterne indrettet så de kunne vedligeholdes?
- Hvilke skader/reparationer var almindelige?

Materiale:

Roms akvædukter side 40, 49 – 51
54 – 57, 148 – 154

Porta Maggiore

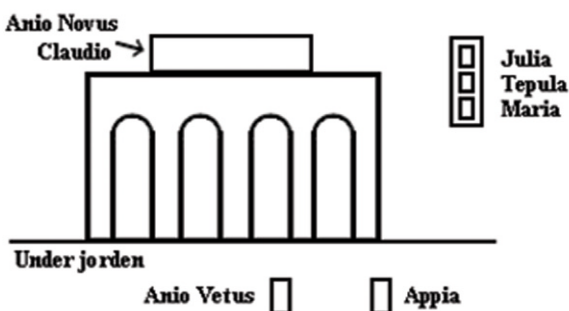
Når vi finder frem til Porta Maggiore er det jeres opgave at omtale stedet. Fx ved at omtale følgende:

- Hvad er det vi ser her?
- Hvor mange akvædukter er der her og hvor?
- Hvor meget vand kunne løbe igennem her når/hvis alt fungerede?
- For nogle af akvædukterne at nævne hvad vandet specielt var beregnet til inde i Rom?
- Det hører også med til opgaven at fremvise modellen af Porta Maggiore på Museet Civiltà Romana i EUR, hvis vi kommer derud.

Materiale:

Roms vandforsyning side 7 – 11
Roms akvædukter side 73 – 77, 133 – 139
kort 2

Grov skitse:



Akvædukter ved Casale di Roma Vecchia

Når vi har fundet stedet omtales følgende et godt sted med udsyn.

- Hvad er det vi ser her og hvilke akvædukter er hvor?
- Hvem satte byggeriet i gang og hvornår?
- Hvor meget vand førte de frem?
- Hvor lange er de?
- Hvorfra blev vandet hentet?

Materiale:

Roms vandforsyning side 7 – 11
Roms akvædukter side 110 – 117, 188 – 193
kort 1, 3, 4
planche 7, 8

Hovedfordelingstanken

På Piazza Vittorio Emanuele findes castellumet. Her gøres klart:

- Hvilket castellum ser vi på - og hvad ved vi om det?
- Hvad er et castellum og hvilken funktion havde det?

Til opgaven hører også følgende, hvis vi kommer ud til EUR:

På figuren side 84 i *Roms akvædukter* vises indretningen af en hovedfordelingstank fundet i Pompeji. På EUR museet Civiltà Romana er der en model.
– Find denne og forklar hvad det er.

Materiale:

Roms vandforsyning side 10 – 11
Roms akvædukter side 75, 78 – 87

Læs ikke om de små castellumer (de små vandfordelingstanke omtales af andre), men om de store hovedfordelingstanke.

De små vandfordelingstanke

På *) omtales følgende:

- Hvilken funktion havde de små vandfordelingstanke?
- Hvordan var de indrettet?
- Hvor fik de vandet fra og hvor løb det hen?
- I hvad blev vandet ledt fra og til?
- Hvorfor ved man så lidt om rørinstallationerne?
- Evt. lidt om vandsnyderi.

Materiale:

Roms vandforsyning opgave 21, 22, side 35-36
Roms akvædukter side 75, 80 – 87, 91 – 94,
146 – 148
planche 17, 18, 19

Af dette materiale skal I kun bruge det om de små tanke – dvs. kun dele af teksten, andre tager sig af hovedfordelingstankene.

*) Piazza Vittorio Emanuele, fordelingstank foran Termini eller Pompeji ved en fordelingstank.

Vandforbrugerne

Ved *) omtales følgende:

- Hvad blev vandt brugt til?
- Hvordan blev vandet leveret til den enkelte romer?
- Eksisterede der virksomheder, der brugte vand?

Materiale:

Roms akvædukter side 88 – 89, 101 – 105
Romerne – dagligliv i det romerske imperium
side 104 – 105
Turen går til Rom (Høeg & Tessio, Politikens Forlag,
17. udgave, 1993) side 98 – 99

*) Caracallas Thermer, Ostia, Pompeji.

Generelt om byers vandforsyning

Ved *) omtales følgende:

- Hvordan indgik vandforsyningen i byplanlægningen?
- Hvordan var “vandkredsløbets” opbygning?
kun i grove træk - andre fortæller mere.
- Hvem stod for opbygningen?
- Hvem stod for vedligeholdelsen?

Materiale:

Roms vandforsyning side 3 – 5
Romerne – dagligliv i det romerske imperium
side 73 – 80, 104 – 107
Roms akvædukter side 19 – 22, 139 – 149

*) Caracallas Thermer, Ostia, Pompeji.

Livet i termerne

Ved *) vil det være godt at høre noget om livet i termerne, samt om selve stedet. Fx om:

- Hvad er termer?
- Hvad skete der i termerne?
- Hvordan var rækkefølgen i badegangen?
- Hvordan blev de administrativt drevet?
- Hvem stod for opførelsen af termer?

Materiale:

Romerne – dagligliv i det romerske imperium
side 108 – 116, 120 – 121
Pompeji (Peter Connally, Forum)
De offentlige bade 1, 2, 3
Turen går til Rom (Høeg & Tessio, Politikens Forlag,
17. udgave, 1993) side 48 – 49, 98 – 99

*) Caracallas Thermer, Ostia (fx Forums eller Neptuns Thermer), Pompeji (fx Forum, Stabian eller Centrale Thermer).

Teknik og installationer i termernerne

Ved *) vil det være godt at høre noget om teknikken i termernerne. Fx om:

- Hvordan skete opvarmningen af vandet og de forskellige rum?
- Hvilke brændsler brugte man?
- Hvordan fik de deres vand?
- Find evt. et toilet og forklar hvordan det virkede? der er et i Ostia!

Materiale:

Romerne – dagligliv i det romerske imperium
side 116 – 120

Pompeji De offentlige bade 1, 2, 3

Turen går til Rom (Høeg & Tessio, Politikens Forlag, 17. udgave, 1993) side 48 – 49, 98 – 99

*) Caracallas Thermer, Ostia (fx Forums eller Neptuns Thermer), Pompeji (fx Forum, Stabian eller Centrale Thermer).

Fontæner

Ved Trevi Fontænen fortælles noget om:

- Fontæner i det gamle Rom
- Nutidens Trevi fontænen

Materiale:

Roms akvædukter side 49 – 53, 73 – 87

Turen går til Rom (Høeg & Tessio, Politikens Forlag, 17. udgave, 1993) side 85

Litteraturliste

- J. O. Bjerregaard Over bjerget efter vand
Sfinx, 8. årgang 1985, nr. 3
- Deane R. Blackman The volume of water delivered by the four great aqueducts of Rome
PBSR 46 (1978), 67
- A. G. Drachmann Antikkens teknik – Redskaber og opfindelser i den græske og romerske oldtid
P. Haase & Søns Forlag 1963
- flere Om Rom
Sfinx, 2. årgang 1979, nr. 2
- S. J. Frontinus Roms akvædukter
Jørgen Hansen, oversat m.m., Museum Tusulanums Forlag, Københavns Universitet 1986
- J. G. Landels Engeneering in the Ancient World
Chatto & Windus, London 1978
- J. D. Larsen Roms Vandforsyning
Sfinx, 3. årgang 1980, nr. 1
- H. V. Morton Roms fontæner
Nyt Nordisk Forlag, Arnold Busk 1967
- Holger Mygind Pompeiistudier
Museum Tusulanums Forlag, Københavns Universitet 1977
- H. P. L'Orange Oltidens bygningsverden
Politikkens Forlag 1978
- T. Schiøler Pompejis vandtårne
Sfinx, 8. årgang 1985, nr. 3
- H. A. Trevor How did Frontinius Measure the Quinaria
The American Journal of Archeology, nr. 88, 1984
- H. A. Trevor Roman aqueducts & water supply
London, Duckworth 1992
- K. D. White Greek and Roman Technology
Cornell University Press, Ithaca, New York 1984
- Peter Ørsted Romerne – dagligliv i det romerske imperium
Gyldendal, 1989