

Grundlæggende principper ved
Pumpesystemer
for spildevand- og regnvand

Torben Larsen

Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet

tlar@build.aau.dk

Grundlæggende principper ved Pumpesystemer for spildevand og regnvand

I dette indlæg kommer vi ind på

Hydraulisk dimensionering

Energieffektivitet

Hydraulisk ruhed, aflejringer, pumpe­slid

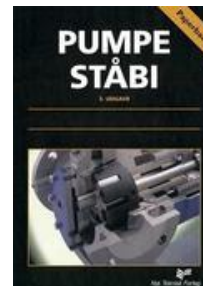
Luftansamlinger

Trykstød

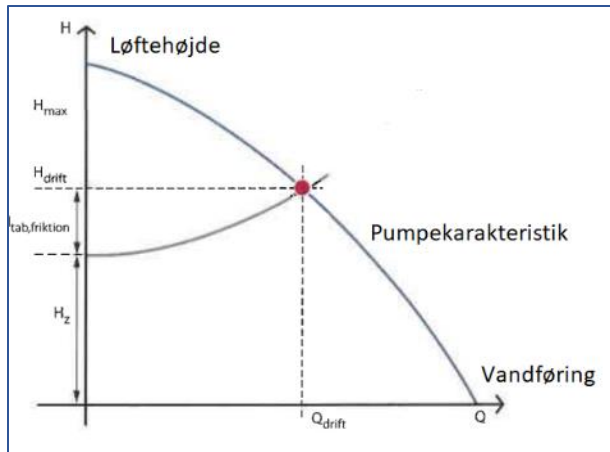
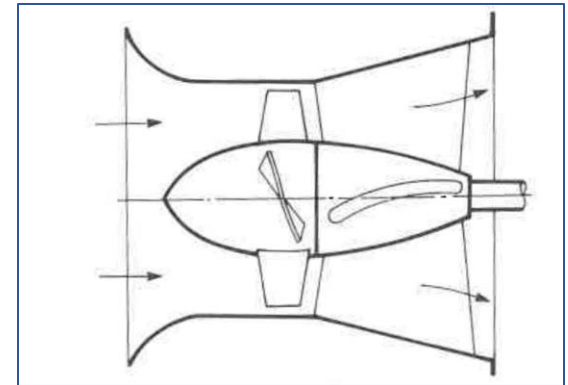
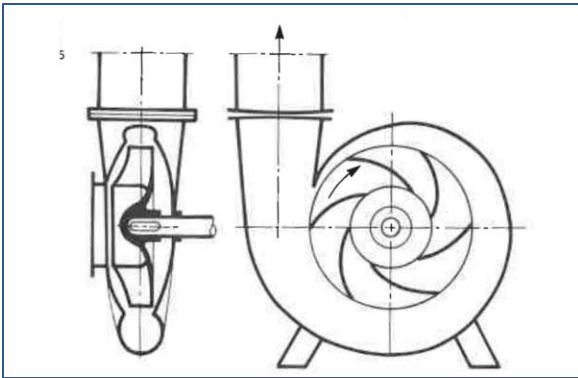
men

Kun pumpesystemer med centrifugal- eller propelpumper omtales.

Maskin- og elektrotekniske aspekter såsom lejer, akseltætninger, tre-fasede asynkronmotorer, frekvensstyring osv. osv. omtales ikke. Læs gerne "PumpeStåbi" for flere detaljer.



Kun systemer med pumper med roterende pumpehjul vil omtales her



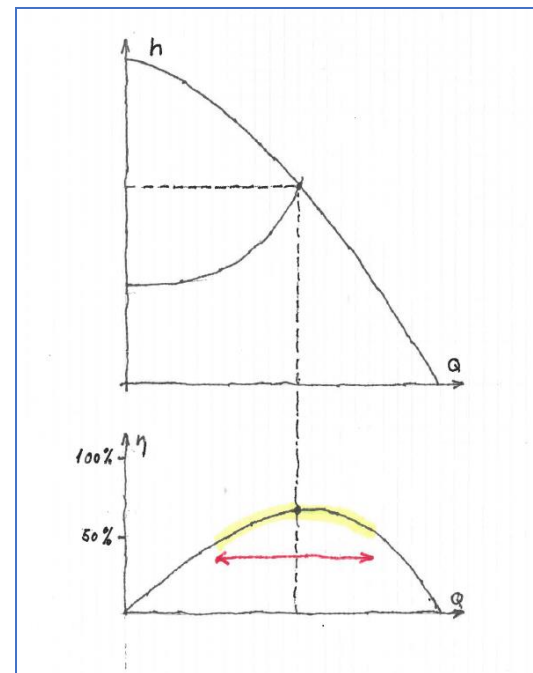
Disse pumper har en parabelformet karakteristikk. Denne kan transformeres med omdrejningstallet n efter

$$\text{Løftehøjde: } h = h_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^2$$

$$\text{Vandføring: } Q = Q_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)$$

Køb en god pumpe

I levetiden er: 75 - 80 % driftsomkostninger og 20 % etableringsomkostninger



Undgå turbulens, støj og vibrationer

Pumpers virkningsgrad kan måles direkte

Ikke ualmindeligt taber spildevandspumper ca. 20 % i løbet af 5 -10 år (bemærk "procent relativt" og ikke "procentpoint")

PUMPS

Canada takes a lead in benchmarking pump energy efficiency

● A large-scale pump performance testing programme looking at over 150 pumps in Canada covered energy efficiency as well as the accuracy of both thermodynamic and conventional pump testing methods. **FABIAN PAPA** and **DIORDE RADULU** summarise the main findings from the programme with regards to improving pump efficiency and the potential for benchmarking.

In May 2013, the results of a large-scale pump performance and energy efficiency testing programme conducted in Canada were released. This programme involved testing of more than 150 water pumps across eight utilities in Ontario, Canada's most populous province, for the purposes of characterizing the actual in situ performance of these devices in order to help drive awareness and motivate energy conservation initiatives. The result is a well-documented reference that can be used by practitioners worldwide for comparative purposes, such as benchmarking, as well as to help improve general practices in this field.

Motivation
The linkages between water and energy are gaining increasing attention globally and, as both financial pressures and concerns over energy security increase, so does the need to thoroughly assess the use of energy and the cost associated with it. With this context in mind, the Ontario Power Authority (OPA), through its Conservation Fund, provided the primary financial support of the above-mentioned programme. OPA is an independent,

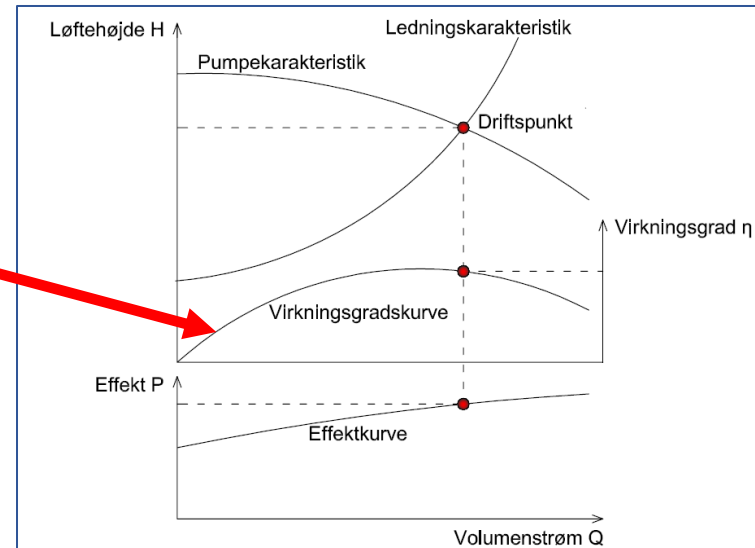
tion of several water utilities in a display of mutually beneficial cross-sectoral collaboration, the results of which are having long-lasting transformative effects on the province's water sector in addition to spillover benefits beyond the boundaries of the participating utilities and the province.

Traditional practices
Although it is both intuitive and understood that pumps deteriorate with time and usage, their performance is generally not measured or monitored. Operation and maintenance practices are often based on rules-of-thumb and qualitative field observations. Hydraulic models are frequently used to design new pumping systems, assess the operation of existing water systems, develop energy optimisation strategies, etc. However, such models generally use original manufacturer specifications for hydraulic performance and energy consumption of pumps without proper consideration of their actual behaviour. As a result, many decisions are made without complete or accurate information and, accordingly such decisions would be expected to be inferior to those that would be made with the best attainable information in hand.

This testing programme goes a long way towards lifting the veil of uncertainty and / or replacement, as well as pump operation. The technologies available for accurate and reliable testing exist and are affordable to implement. However, the real benefits are derived from the information obtained and the savings that can often be realized.

The programme
Over the course of 2011 and 2012, field tests of more than 150 pumps were conducted, using either or both of the thermodynamic and conventional pump testing methods. While both methods are capable of producing reliable results when favourable site conditions permit, it was found that the thermodynamic method – which determines a pump's efficiency by measuring the unproductive thermal energy gain in the pumped fluid (water) – is generally more applicable, accurate and reliable than the conventional method when it comes to most field tests. The thermodynamic method involves the junction of temperature probes and pressure gauges on both the upstream and downstream sides of the pump (Figure 1), as well as the measurement of power input to the pump's motor. The pumps ranged in age from less than one year old to 61 years old, and their motor sizes ranged from 22kW (30 hp) to 300kW (400 hp). Approximately 15% of all pumps tested were controlled using variable frequency drives (VFDs). As part of the

Figure 1: The thermodynamic testing method

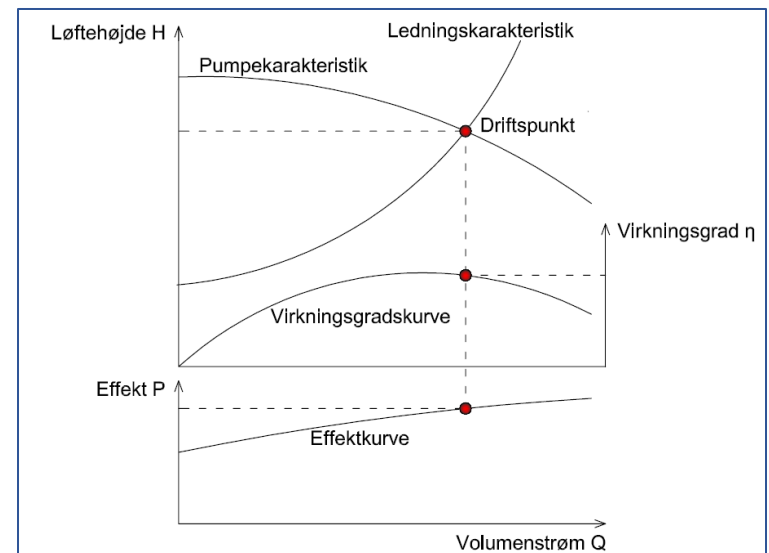
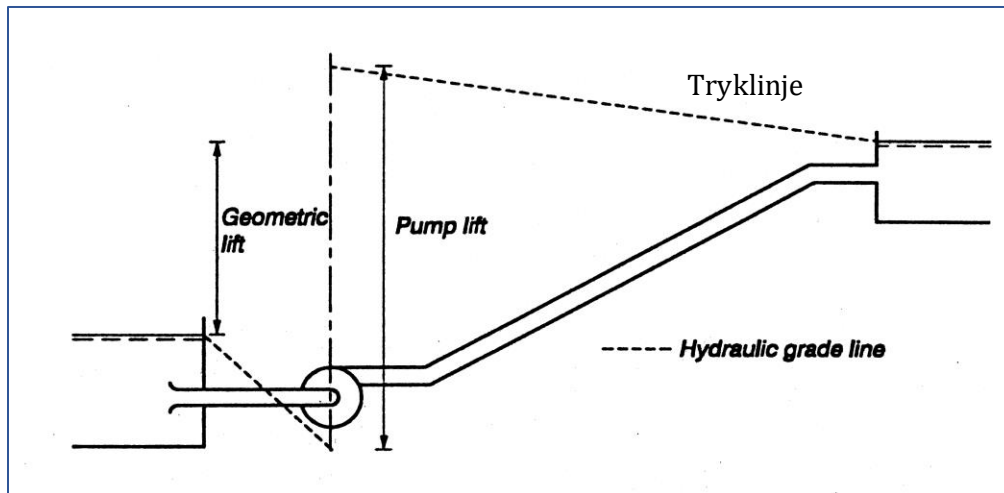



Forskere og rådgivere fra Toronto University har udviklet en metode hvorved pumpe virkningsgrad kan måles direkte termodynamisk. Princippet er afprøvet på 150 pumpestationer i ontario, Canada. Metoden indgår i en økonomisk "levetidsmode" for beslutning bl.a. om hvornår pumper skal udskiftes.

Article in
Journal of Water Supply: Research and Technology
AQUA - May 2014

Grundlæggende hydraulisk dimensionering

Driftspunktet findes som skæringspunktet mellem pumpekarakteristik og systemkarakteristik (ledningskarakteristik)



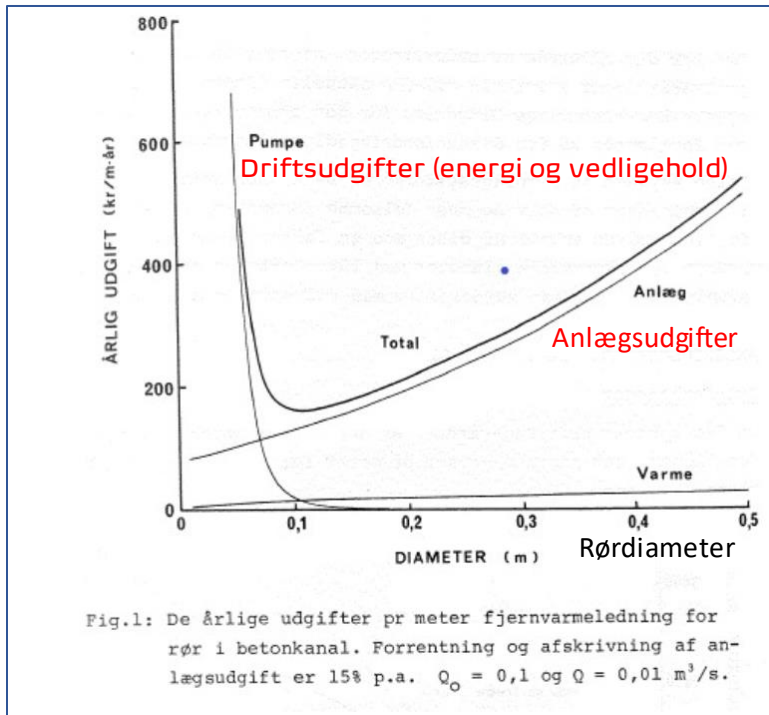
Nu har vi købt en god pumpe. Kan vi gøre noget ved rørledningen?

- 1) Det hydrauliske energitab?
- 2) Den geometriske løftehøjde?

Har vi den rigtige økonomiske strømningshastighed i vores kloakpumpeledninger?

De samlede levetidsomkostninger for kloakpumpesystemer består af: Drift 80 % og anlæg 20 %

Lærebøgerne anbefaler en strømningshastighed på 0,8 - 1,2 m/s. Er det korrekt i 2023?



Eksempel på årlige levetidsomkostninger som funktion af rørdiameter for fjernvarmeledning. Dette ses aldrig (sjældent) for spildevandssystemer ???

Hurtigfærger på Kattegat sænker farten for at spare brændstof

Stigende energipriser fører til færre færgeafgange og øget overfartstid mellem Aarhus og Sjællands Odde.



Det betaler sig at sætte hastigheden ned

- hvis man ellers tør!

Der findes pumpestyringer, der automatisk øger hastigheden, hvis modstanden bliver for stor

Ældgammel artikel fra "Stads- og Havneingeniøren nr. 10, 1998

Bilag V5 Energibesparelse kontra selvrensning

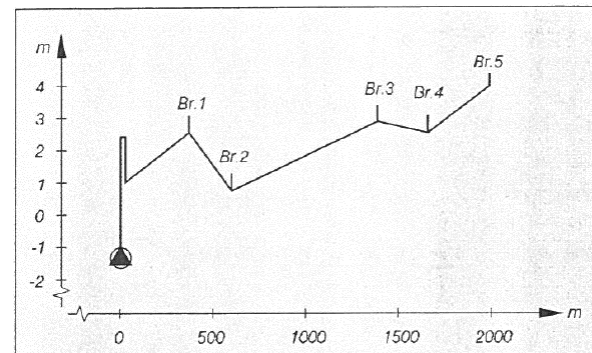
i kloakpumpesystemer

Af Torben Larsen, Aalborg Universitet samt Benny W. Jepsen og Jens Chr. Binder, Nelleman, Nielsen og Rauschenberger A/S

Ved pumpning af kloakspildevand skal den hydrauliske friktionsmodstand i pumperøret overvindes af pumpen. Denne modstand vokser med kvadratet på strømhastigheden, og der er derfor mulighed for energibesparelser, såfremt strømningshastigheden kan reduceres. Ved forsøg i Nørholm kunne hastigheden reduceres fra 0,8 m/sec til 0,5 m/sec, hvorved energiforbruget faldt med 25%.

Pumpning kræver som bekendt energi, og det er derfor naturligt at overveje om det er muligt at opnå energibesparelser. Til undersøgelse heraf har der været gennemført et projekt i fuld skala på en kloakpumpeledning ved Nørholm i Aalborg Kommune. Man har her registreret virkningen på energiforbruget ved at nedsætte strømningshastigheden over længere tid.

Dette projekt er gennemført med støtte fra Energistyrelsens Energiforskningsprogram. Desuden har Danfos A/S og Aalborg Kommune, Nelleman, Nielsen og Rauschenberger A/S og Aalborg Universitet bidraget.



Figur 2. Længdeprofil af pumpeledning i Nørholm

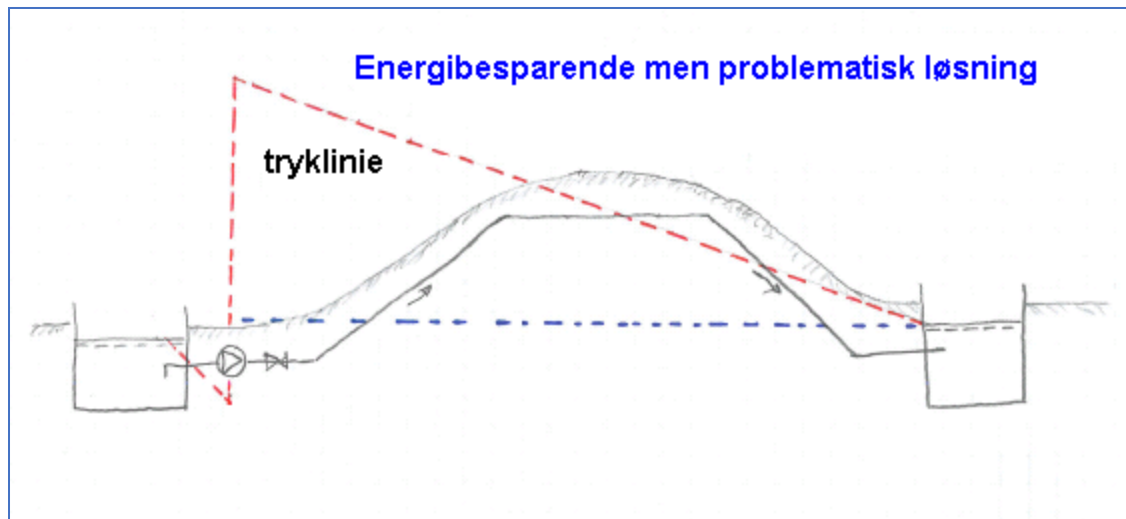
Hastighed m/s	Energiforbrug kWh/m ³	Relativt energiforbrug %
0.80	0.091	100 %
0.65	0.074	81 %
0.57	0.069	76 %
0.48	0.062	68 %

Tabel 2. Energibesparelse.

Når hastigheden reduceres fra 0,80 til 0,48 m/s reduceres energiforbruget 25 %. Den hydrauliske ruhed stiger fra 0,35 til 0,60 mm. Senere ses at ruheden falder igen når farten går op igen.

Den geometriske løftehøjde

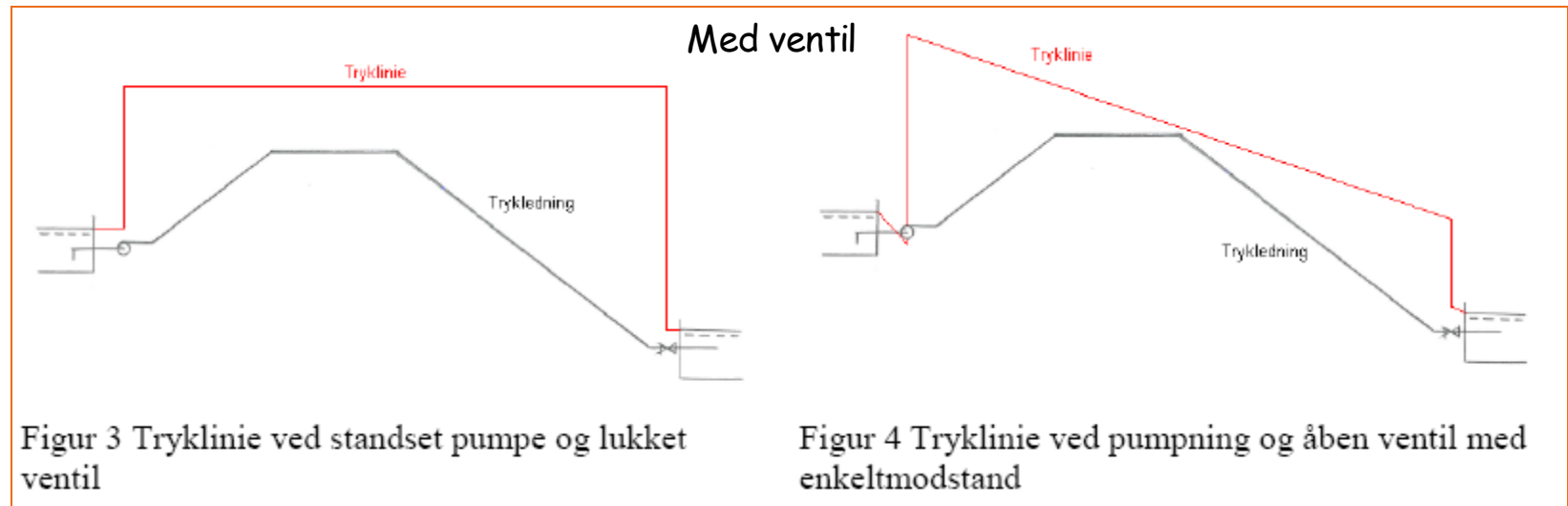
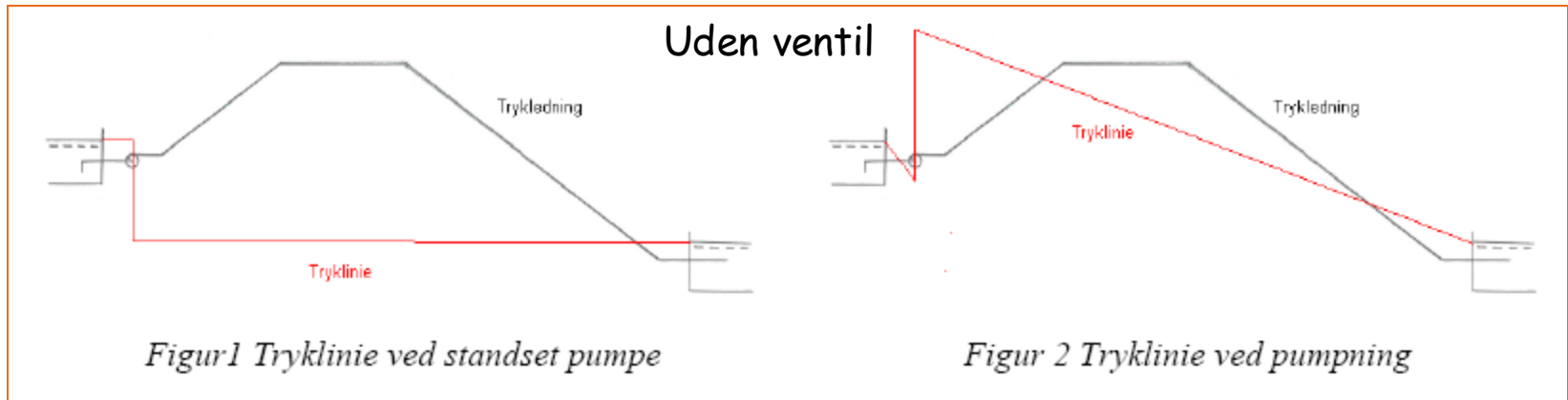
Vi kan spare energi ved at pumpe nedad bakke
Pas på med undertryk - luften kommer måske aldrig ud



Traditionelt ville vi pumpe vandet op til toppen af bakken og lade det løbe ned i en gravitationsledning

En styrbar ventil ved endepunktet kan hjælpe os med at pumpe nedad bakke

Det er naturligvis forudsat at den geometriske højdeforskel er for lille til at drive strømmingen ved gravitation



Trykstød

Trykstød handler om den påvirkning vandet har på rørledningen når vi starter og stopper

Overtryk - brud

Undertryk - buckling

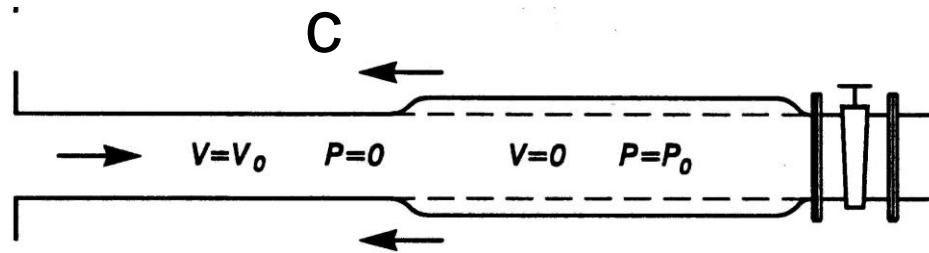
Hastighedsændring giver trykændring

Joukowskys formel

Joukowskys formel er Newtons 2. lov omskrevet for væsker.
Pointen er: Ventilen lukker momentant, men hele vandstrengen bremses ikke momentant, men gradvist.



N.E. Joukowski



$$\Delta h = \pm \frac{c}{g} \Delta v$$

Eksempel:

$$c = 300 \text{ m/s}, \quad \Delta v = 1,0 \text{ m/s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$$

$$\Delta h = \pm \frac{300}{9,81} 1,0 = 30,6 \text{ mVs}$$

Trykbølgens forplantningshastighed c

Spørg altid rørleverandøren

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \Phi \right)}}$$

ρ væskens densitet

K væskens sammentrykkelighedsmodul

D rør diameter

e rørets vægtykkelse

E elasticitetsmodul af rørvæg

Φ indspænding i længderetning

Spørg altid rørleverandøren

Plastrør 250 - 400 m/s

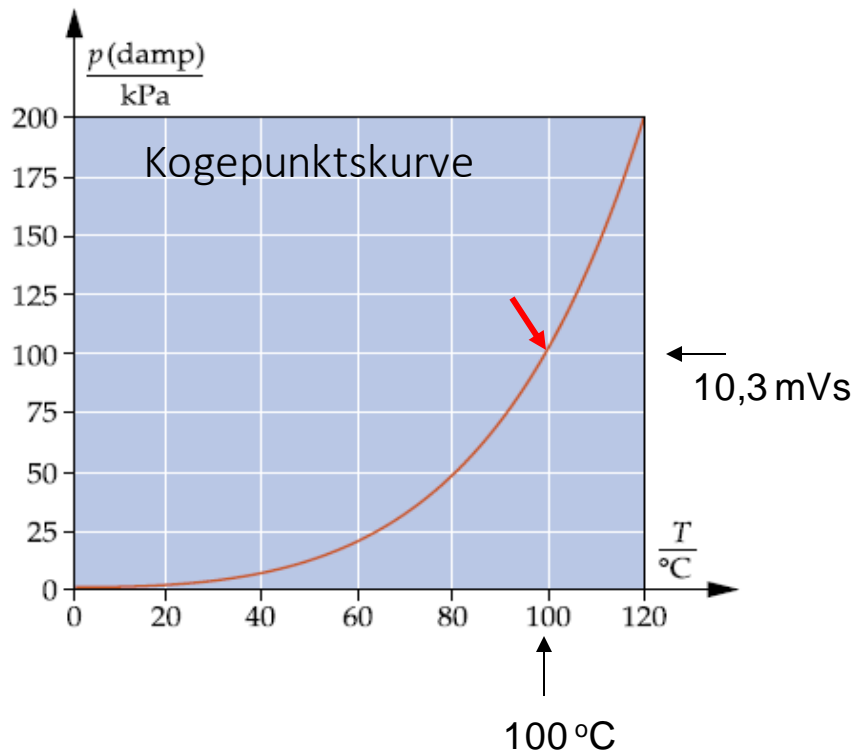
Stålrør 1000 - 1500 m/s

Airbus 320 flyver 235 m/s

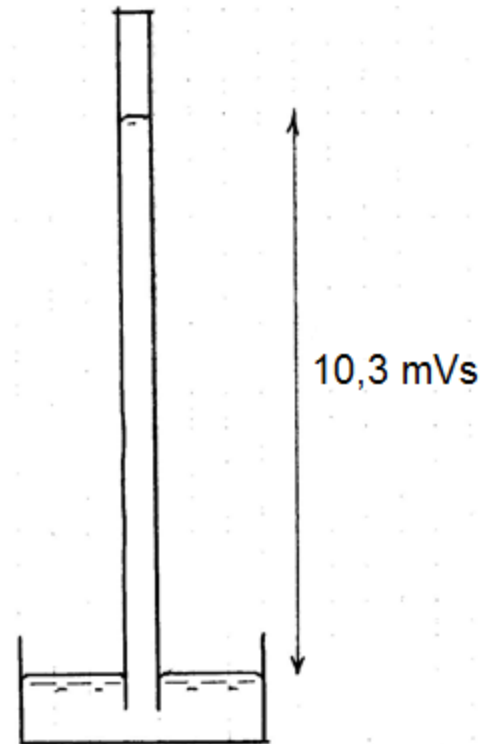
Vand kan gå i stykker hvis vi trækker for meget i det.

Undertryk giver

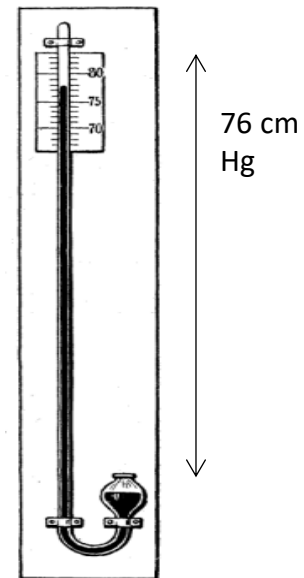
Kavitation



Vand-barometer



Kviksølv-barometer



Luftryk ved havets overflade: 1 atmosfære = 1013 hektoPascal = 10,3 m vandsøjle = 76 cm kviksølv-søjle

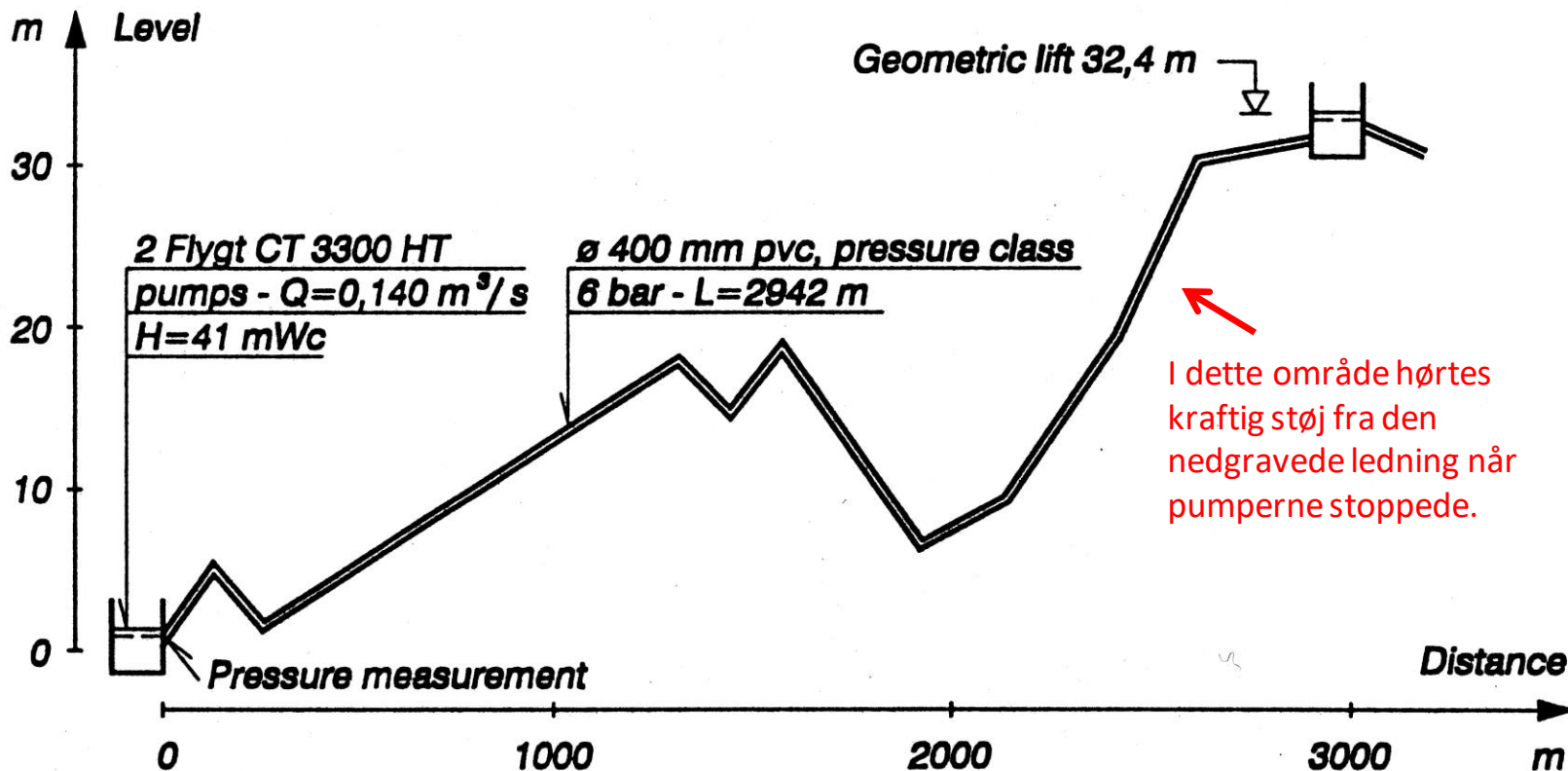
La Paz Lufthavn (Bolivia) ligger i 4,1 km over havet. Her er luftrykket 6 mVs (ca. 600 hektoPascal).

Trykstød

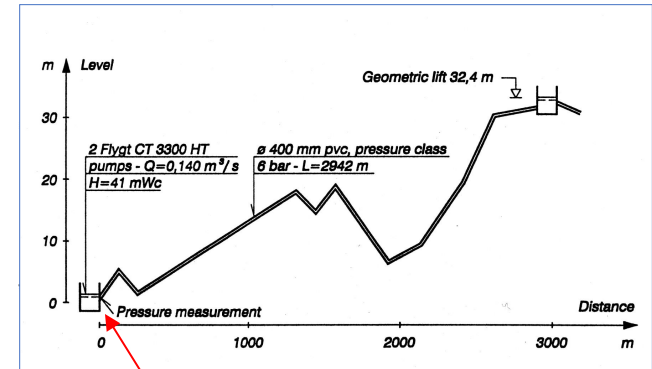
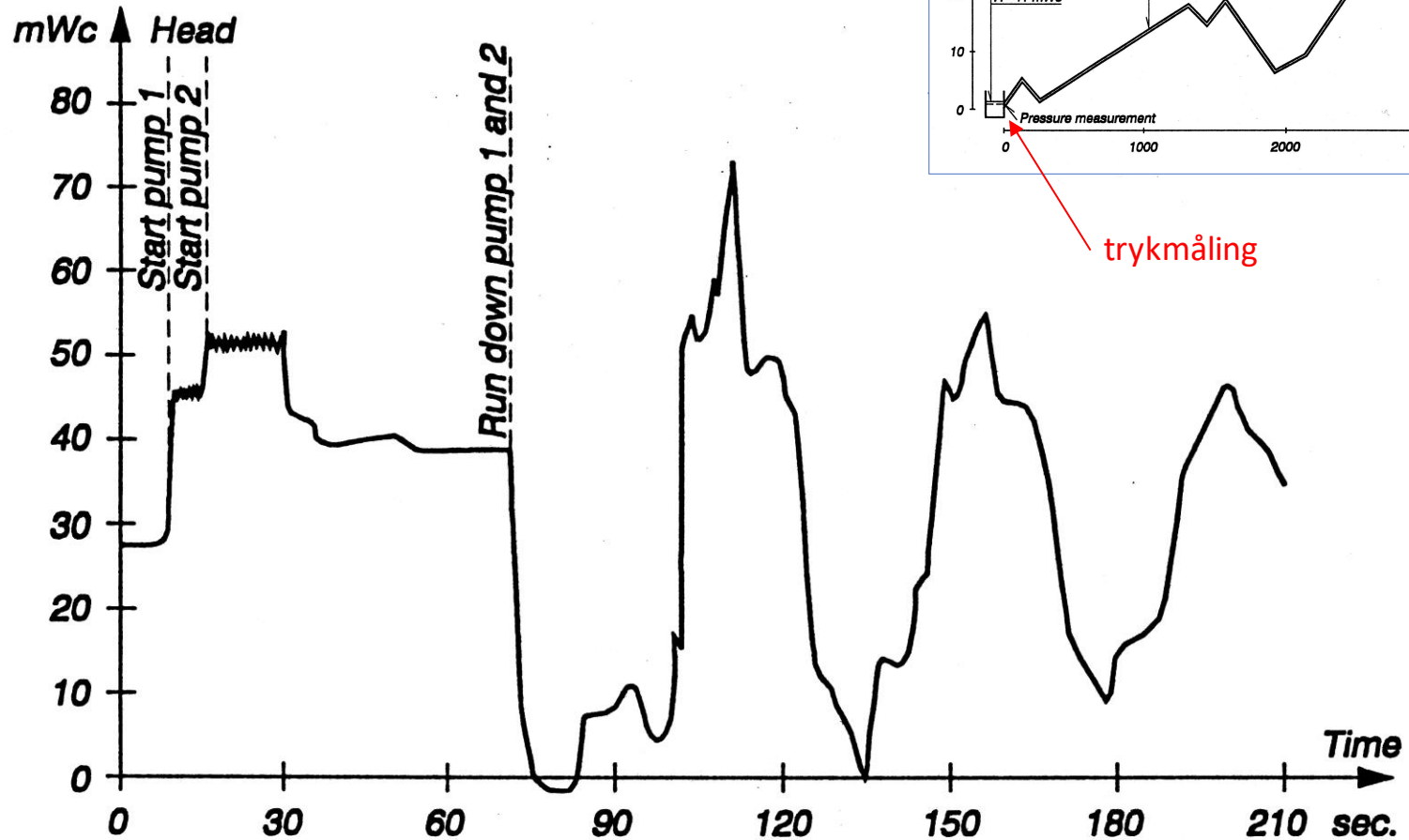
Trykmåling ved start og stop af pumper

Eksempel fra Thy

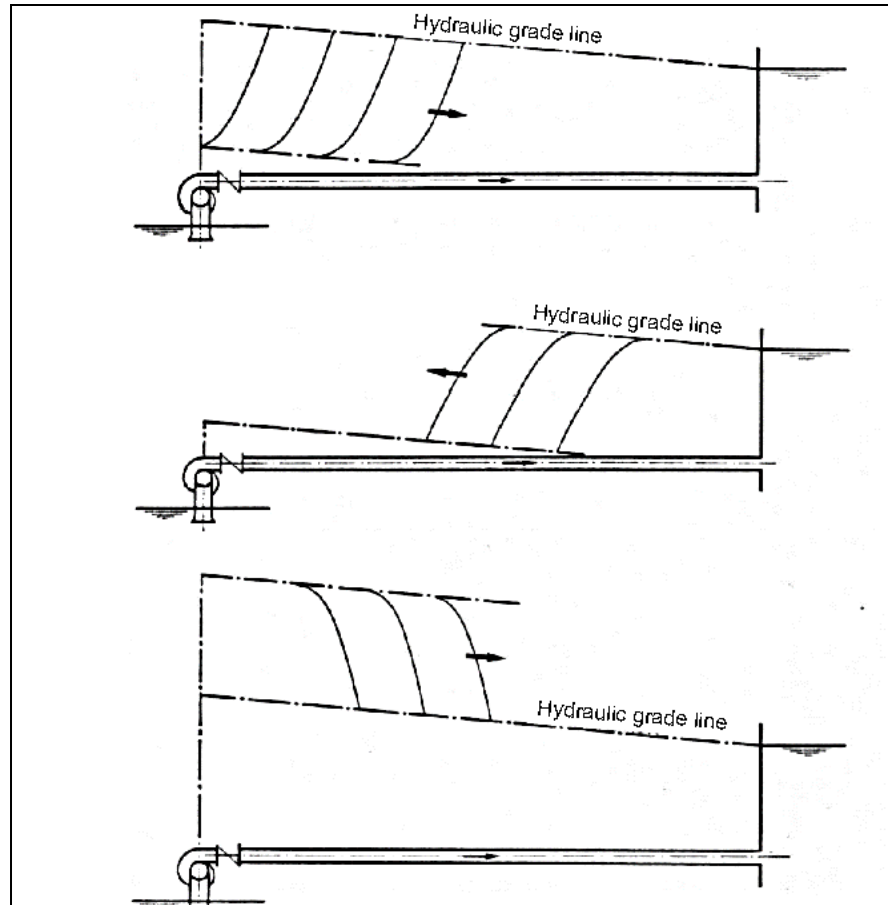
I ledningen befinder sig ca. 350 tons vand som strømmer med en hastighed på 1,24 m/s



Trykmåling ved pumpe



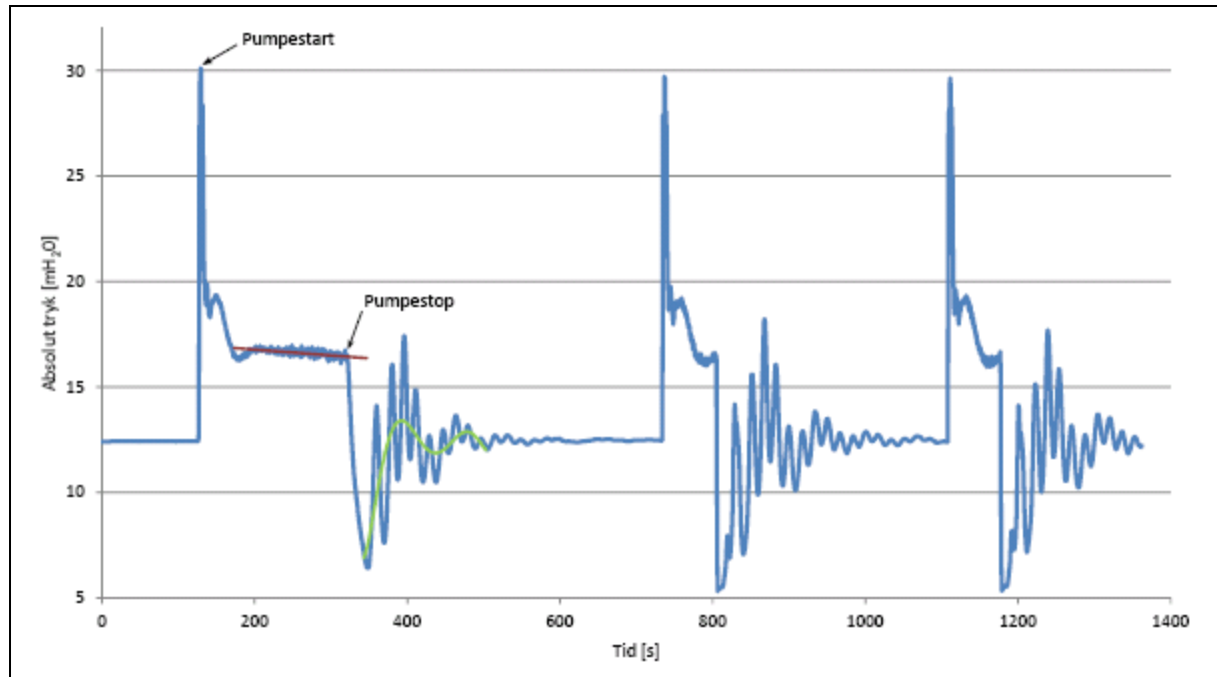
Refleksion of trykstød ved pumpestop



Generelt set reflekteres trykstød 100 % fra både åbne og lukkede endepunkter i en rørledning

Trykmåling pumpestation Egensevej, Aalborg Øst

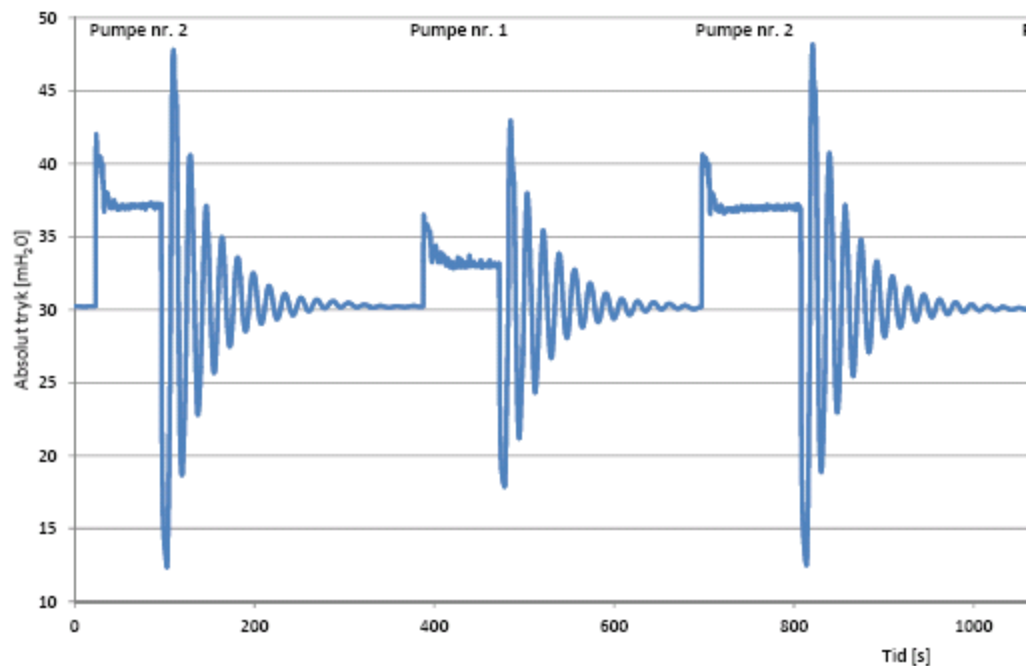
$L = 1740 \text{ m}$
 $D_i = 508 \text{ mm}$
 $h_{\text{geo}} = 5,80 \text{ m}$
 $Q = 225 \text{ l/s}$



Trykmåling pumpestation Syrenvej, Kongerslev

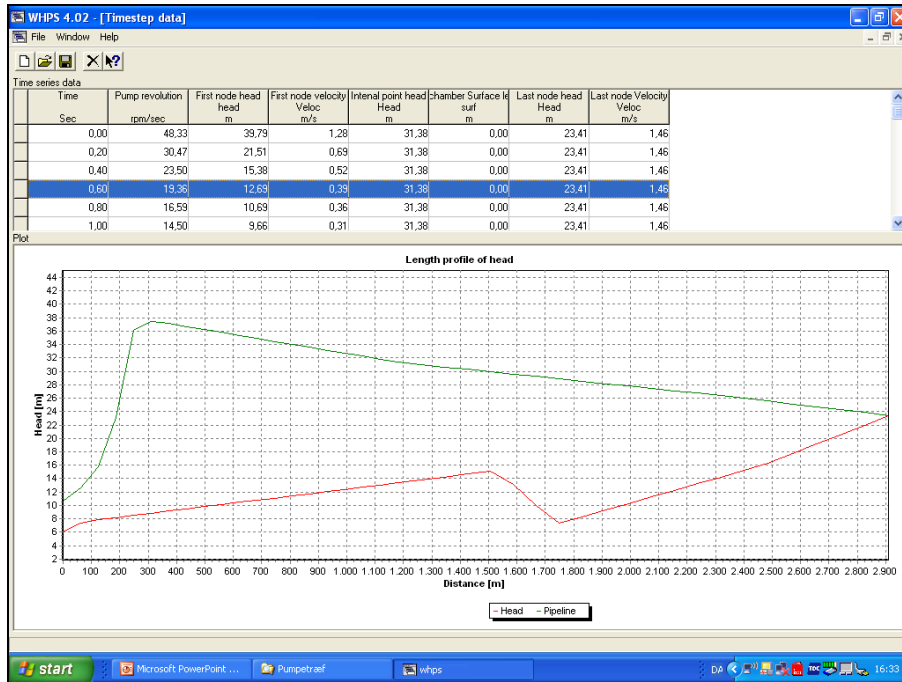
Pumpehjul i PUMPE 1 er lettere beskadiget

L = 1950 m
Di = 176,2 mm
hgeo = 24,4 m
Q = 25 l/s

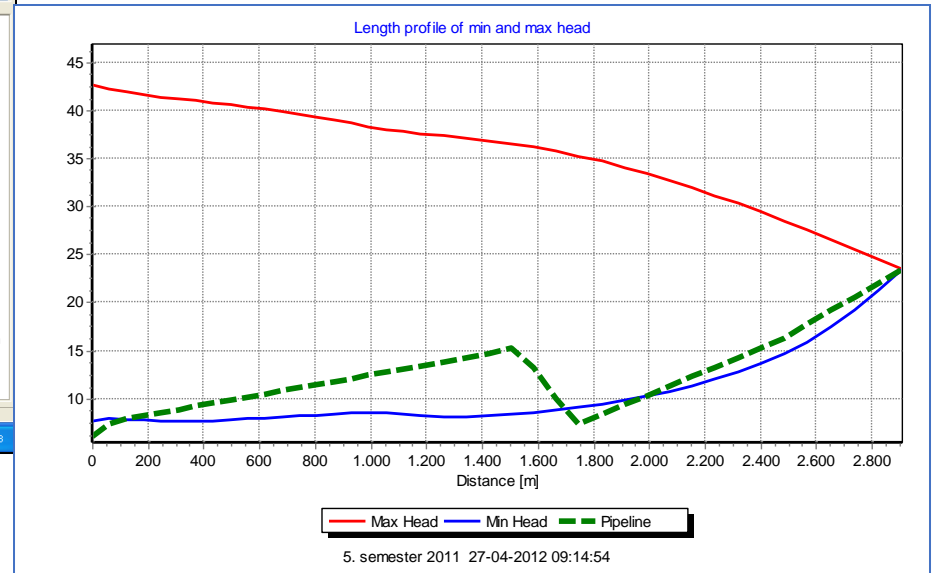
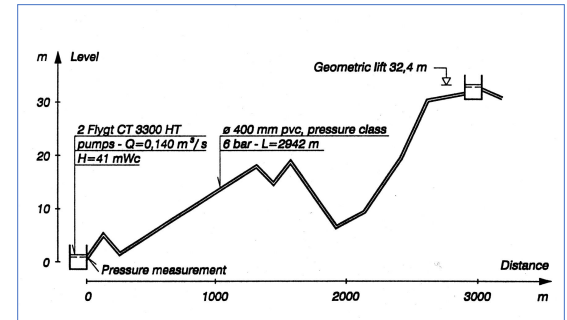


Edb-modellering af trykstød

Pumpeledning i Thy fra tidligere slide



Tryklinien kort efter start af simulering



Resultat af simulering

Indhylningskurver for tryklinien der viser max og min under simulering

(Her ses situation med vindkeddel, dvs. uden kavitation)

Fire hovedpunkter værd at huske om trykstød

1. Hastighedsændring giver trykændring (trykstød)
2. Stop af pumpe giver oftest det største trykstød
3. Trykbølger reflekteres 100 % som både overtryk og undertryk
4. Undertryk giver ofte kavitation

Foranstaltninger mod trykstød

Alt hvad der kan trække hastighedsændringerne ud i tid kan bruges
Strømfald vil ofte være det største problem

Omdrejnings-
regulering

Vindkeddel
(hydrofor)

Kontrolventil
(styrbar ventil)

Tryktårn(e)

Luftventil

Svinghjul

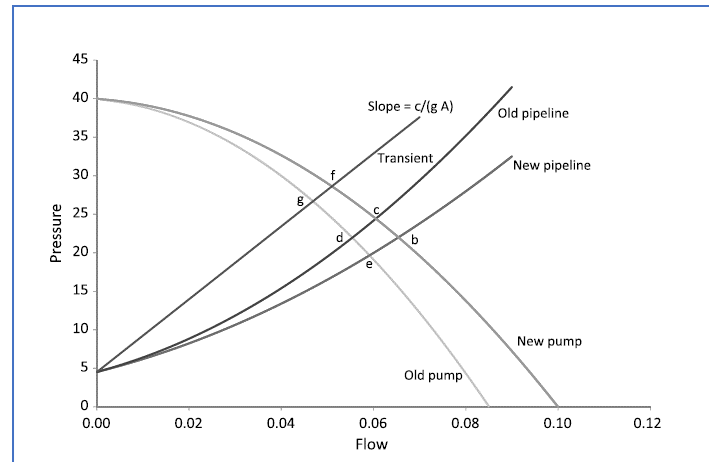
Andre muligheder

Elastiske rør (plastrør frem for stålrør)
Elastisk vand (vand med suspenderede
luftbobler - normalt en dårlig idé)

Nu tilbage til spørgsmålet om
hydraulisk modstand i rørledning

Vi oplever at det specifikke energi forbrug (kWh/m^3) går ned (dvs. det samlede virkningsgrad aftager). Det nok vigtigste spørgsmål er nu:

Er det pumpen eller ledningen det er galt med ?

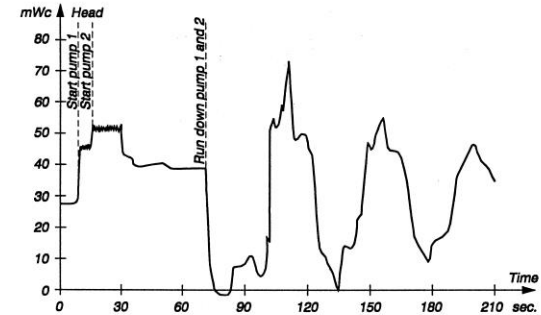
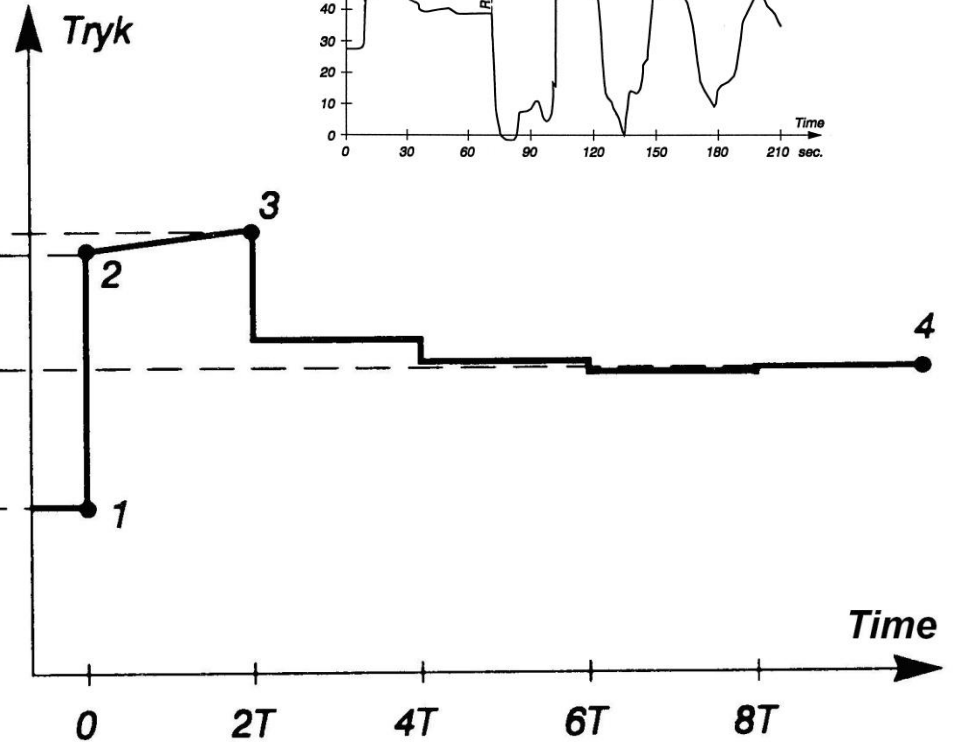
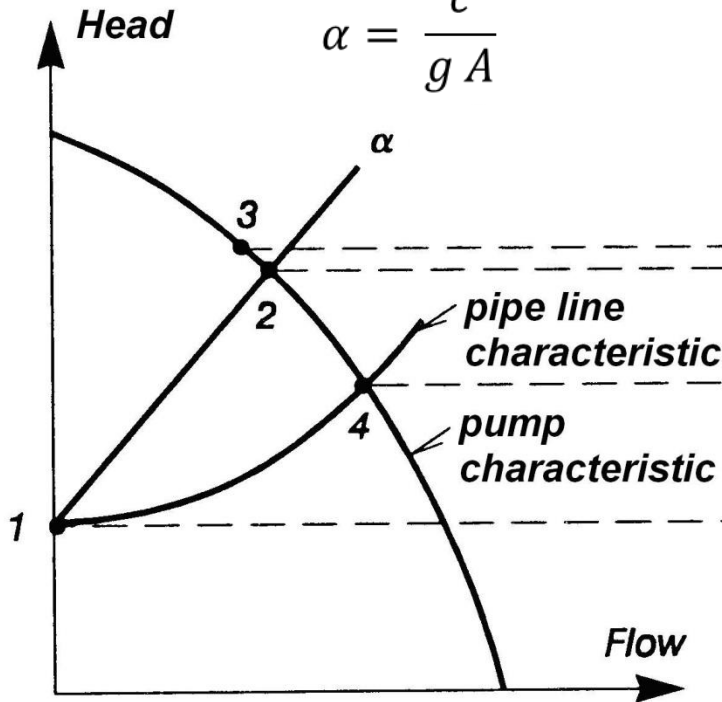


(Billeder fra Silkeborg Kommune)

Trykstød ved pumpestart

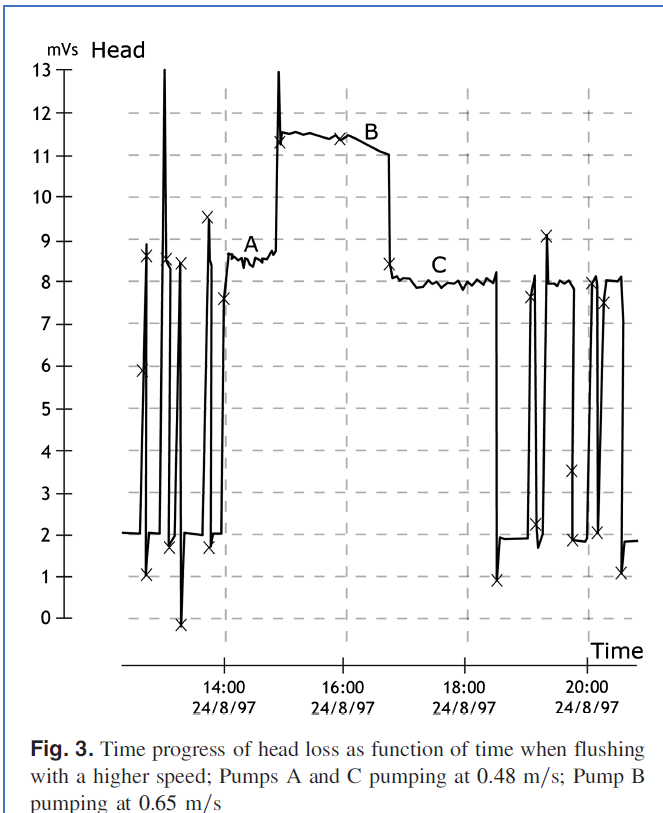
$$\Delta h = \frac{c}{g A} \Delta Q$$

$$\alpha = \frac{c}{g A}$$

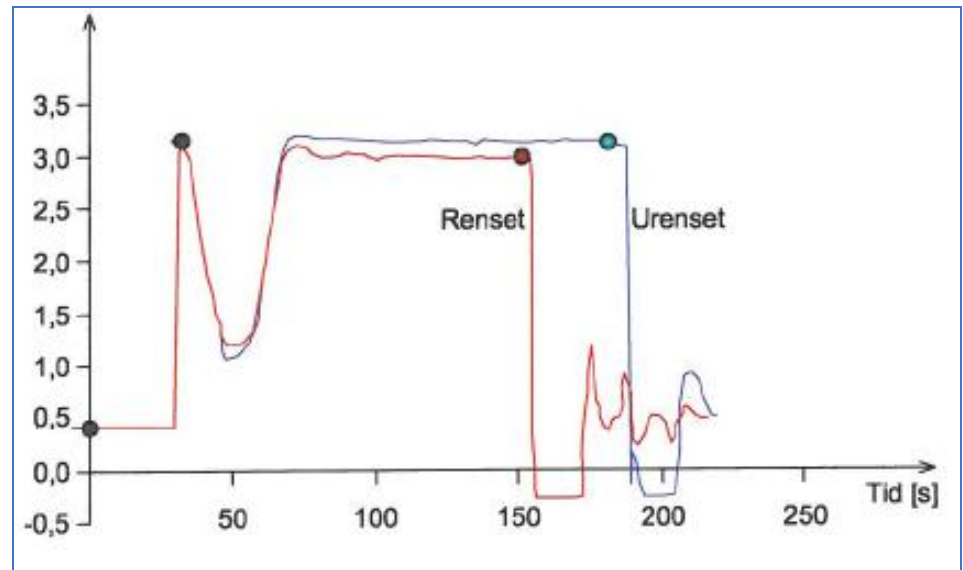


Ved for stor rørmodstand: Vi kan rense med rensegris eller vi kan skylle med større hastighed

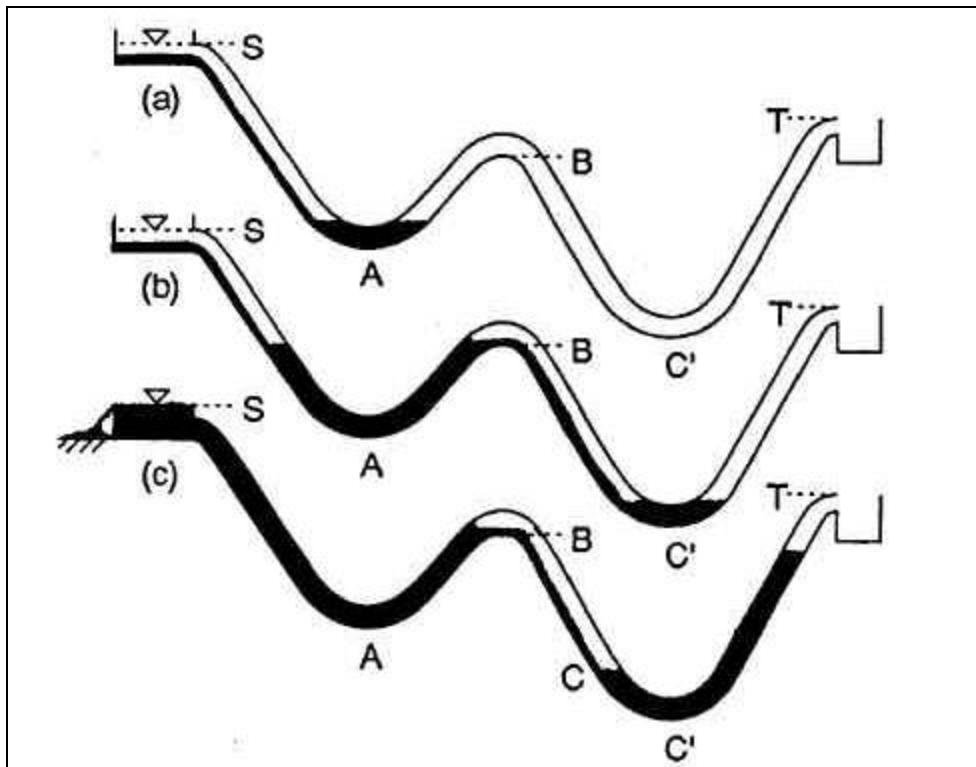
Trykmålinger ved pumpestationen afslører det meste



Virkning af skylning



Luft i rørledninger er nok det sværeste problem vi har



Fyldning af tom ledning

Automatiske luftventiler fungerer fint hvis de ellers sidder dér hvor luften er (- og det gør de sjældent)



Kritisk minimumshastighed for fjernelse af luftlommer

store rør, store problemer - små rør, små problemer

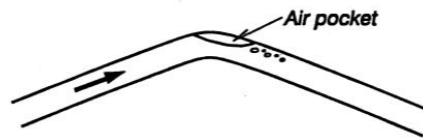


Figure 2.5. Air pocket at a high point.

To remove air from an air pocket a minimum flow velocity V_{min} is required (Mosevoll, 1987). The empirical equation for V_{min} is:

$$V_{min} = 0,6\sqrt{gD} \quad [\text{m/s}] \quad (2.12)$$

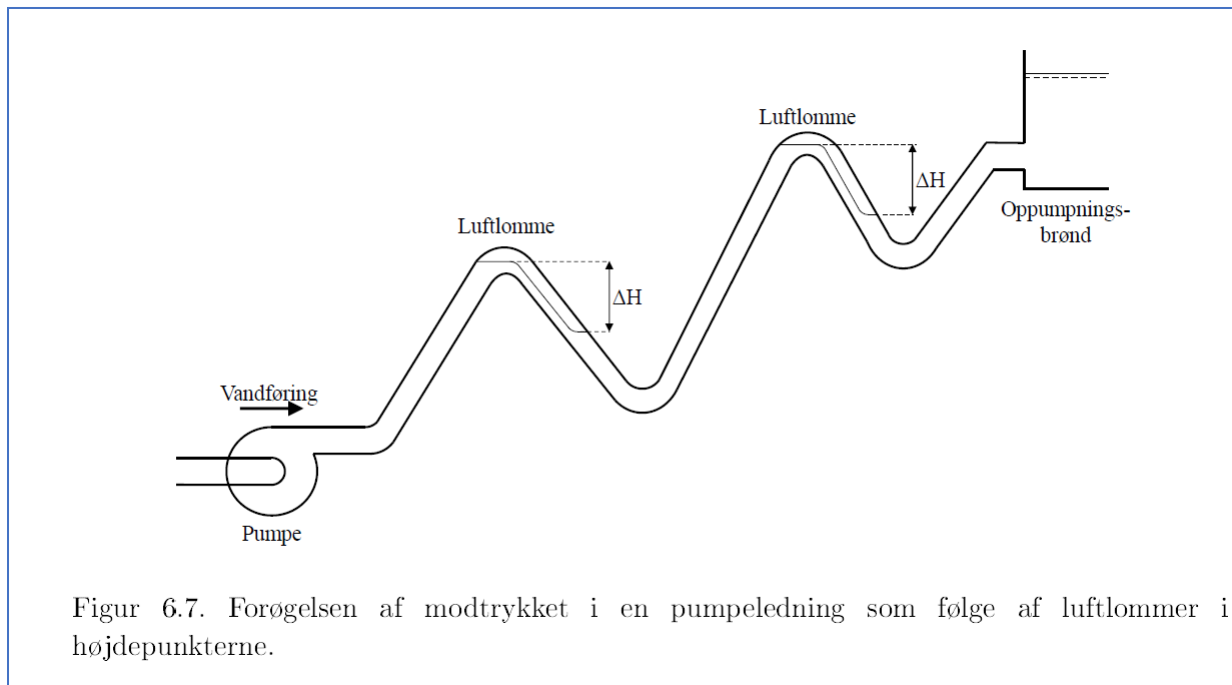
where D is the diameter of the pipeline.

Strømningshastighed m/s	Kritisk diameter for luftfjernelse (mm)
0,8	180
1,0	280
1,2	410

Luftlommer

Den klassiske løsning for dimensionering af pumpeledning i bakket terræn.

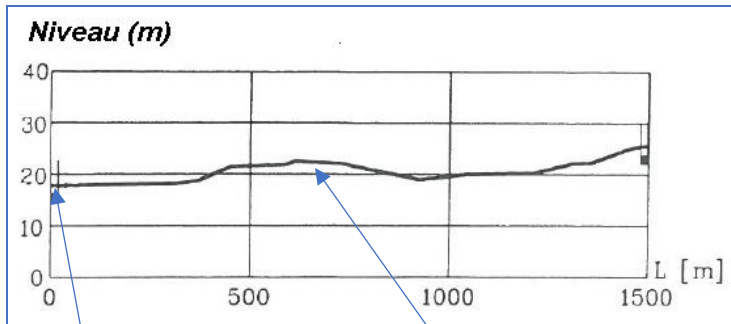
Den geometriske løftehøjde tilføjes den samlede højdeforskkel af alle nedadgående ledningsstrækninger



Trykstød ved pumpestop i ledning med luftansamling

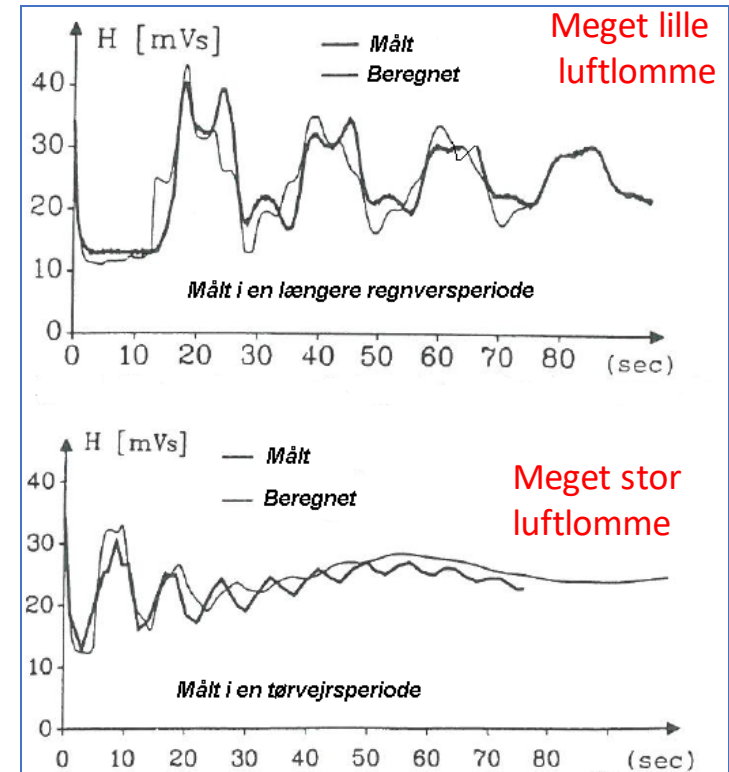
Trykmåling ved pumpestation ved pumpestop

Længdeprofil



Trykmåling
ved pumpestation

Luftlomme



Ved stationær drift kører systemet fint i regnperioder, men køre dårligt det meste af tiden i tørvejrperioder (dvs. større hydraulisk modstand)

Vedligehold nytter, men kan det betale sig?

Kun få eksempler på publiceret dokumentering af spildevandspumpers vedligehold eksisterer

Korving, H., Clemens, F. H. R. and Noortwijk, J. M. v. (2006).

Statistical Modeling of the Serviceability of Sewage Pumps. Journal of Hydraulic Research, ASCE, October 2006.



Amsterdam

Forebyggende vedligehold

Regelmæssigt tilsyn og udskiftning af komponenter

Rotterdam

Vedligehold efter behov (haveribaseret)

Prioritering af rækkefølge af reparationer

	Antal fejl pr. pumpe pr. år	Varighed af fejl timer
Amsterdam	4,3	13,5
Rotterdam	13	10
(Vandforsyning USA)	(0,27)	-

Det var så sidste slide

Slut
og tak for opmærksomheden 😊