

Energioptimering på mindre og mellemstore vandværker.

Karsten Agersted, Lejre Vandråd. September 2014

Indledning

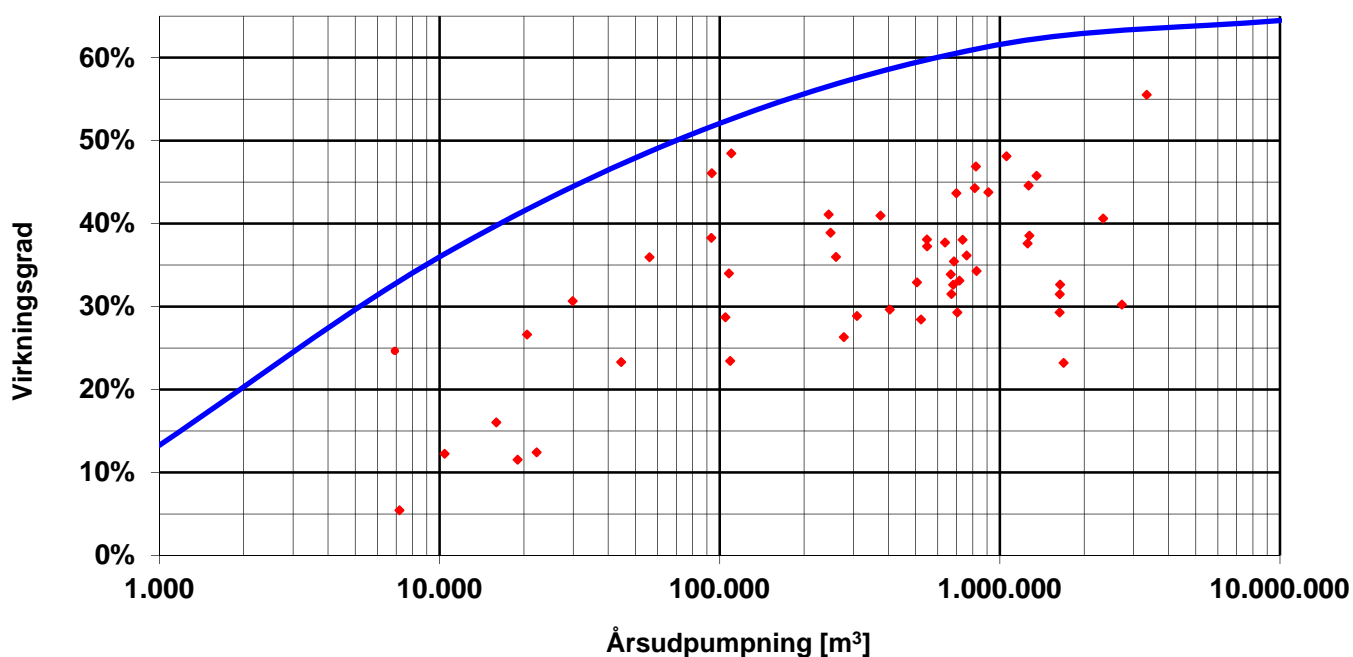
De forbrugerejede vandværker i Lejre kommune bruger væsentlig forskellige energimængder (strøm) per leveret kubikmeter drikkevand. Derfor startede Lejre vandråd i 2014 et projekt for at belyse mulighederne for energioptimering på mindre og mellemstore vandværker. Hensigten var, at det enkelte vandværk skulle kunne beregne en i praksis opnåelig virkningsgrad og skulle kunne identificere oplagte energimæssige problemer. Derefter vil man på et mere oplyst grundlag kunne beslutte om og evt. hvad man kan gøre for at nedbringe sit energiforbrug.

Lejre Vandråd arrangerede først en foredragsaften og en workshop for medlemmerne. I korte træk formidlede foredragsaftenen, at et vandværks specifikke energiforbrug (kWh/m^3) ikke overraskende er afhængigt af den samlede løftehøjde fra boringsvandspejl til højest liggende forbruger. Desuden er energiforbruget i høj grad også afhængigt af værkets størrelse, da blandt andet nyttevirkningen i store pumper er højere end i små. Foredraget gav et bud på den i praksis opnåelige energieffektivitet, jf. figur 1, og der blev desuden givet råd om, hvor man skal lede efter ofte forekommende energislugere, både installationsmæssigt og driftsmæssigt. Workshoppen var mere praktisk orienteret, idet de tilstedeværende vandværker blev vejledt i at udregne energieffektiviteten på deres respektive vandværker på baggrund af egne data. Desuden diskuteredes relevansen af resultaterne og eventuelle indsatsområder.

Nu vil Lejre Vandråd gerne formidle budskabet og metodikken til en bredere kreds end de vandværker, der kunne afsé tid til Workshoppen, og har i samarbejde med konsulenten, firmaet "Øllgaard A/S", samlet materialet og erfaringerne i en mindre og lettilgængelig rapport, en slags kagebog i energioptimering. Den giver en kort gennemgang af baggrunden og beregningsmetodikken som grundlag for de konkrete anvisninger på hvorledes man selv kan lave de relativt simple beregninger. Kagebogen anviser også hvorledes det er muligt at relatere resultaterne til det energiforbrug, der erfaringsmæssigt kan opnås for centrale processer i et

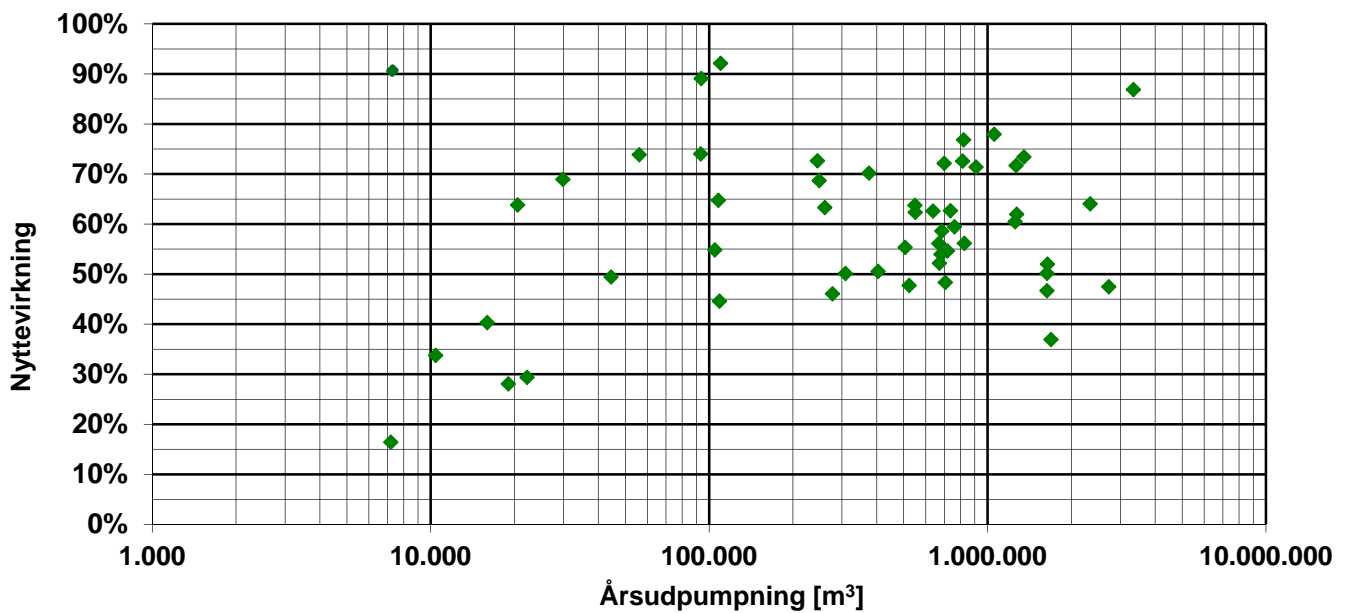
vandværk. Rapporten findes på datamedie og indeholder et regneark kaldet "Energirapport", der efter indtastning af data vil give et øjebliksbillede af vandværkets energieffektivitet. Det er tillige tænkt som et værktøj, der ved regelmæssig brug kan hjælpe med at følge udviklingen i energiforbruget på det enkelte vandværk.

Langt fra alle vandværker, specielt ikke meget små værker, vil kunne drage umiddelbar økonomisk fordel af at kende deres egen "energisluger". Eksempelvis vil installation af en frekvensregulator måske kun vanskeligt lade sig indtjene via reduktionen i elforbruget, men kendskabet til fordelingen af energiforbruget på værket vil være en hjælp for ethvert vandværk i vedligeholdelses- og udskiftningsrutinerne.

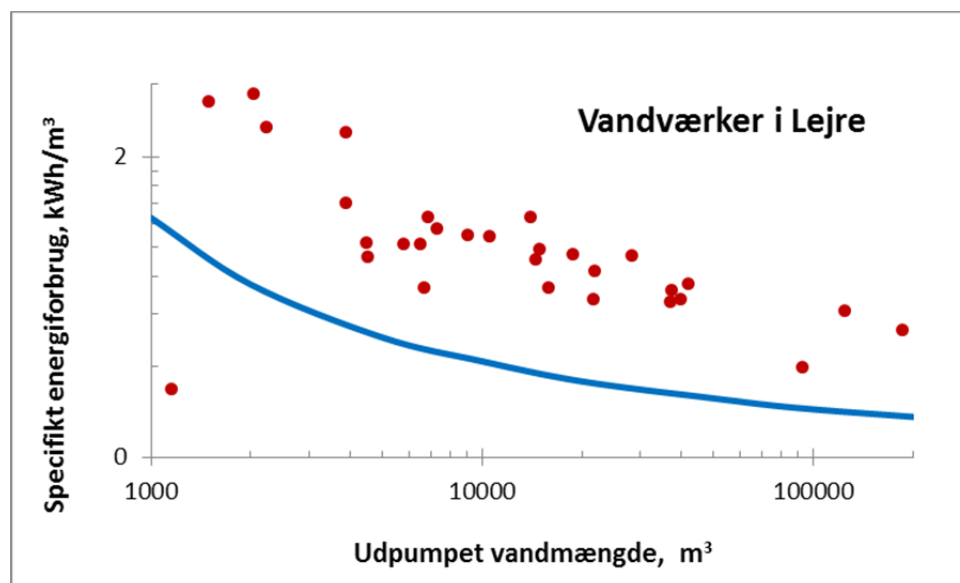


Figur 1: Energi-virkningsgrad vs. årsudpumpning, DANVA's benchmarking 2009. Den blå linje viser en opnåelig virkningsgrad for et ideal-vandværk, ref: Øllgaard et al (2010), DanskVand 2/10 p. 16.

Hvis man lader den fuldt optrukne (blå) kurve i figur 1 være det maksimalt opnåelige for et værk af en given størrelse, repræsenteret ved årsudpumpningen, kan man udtrykke værkets aktuelle energiforbrug i forhold hertil og derved beregne tal for værkets nyttevirkningsgrad. Dette er vist i figur 2, og det ses, at selv om der stadig er en vis tendens til, at store værker er mere energieffektive end små, er det langt fra umuligt for et mindre eller mellemstort værk at opnå nyttevirkningstal, der ligger helt på linje med de største værker.



Figur 2: Vandforsyningsanlæggenes nyttevirkning: Aktuell virkningsgrad i forhold til den opnåelige virkningsgrad vs. årsudpumpning, ref: Øllgaard et al (2010), DanskVand 2/10 p. 16.

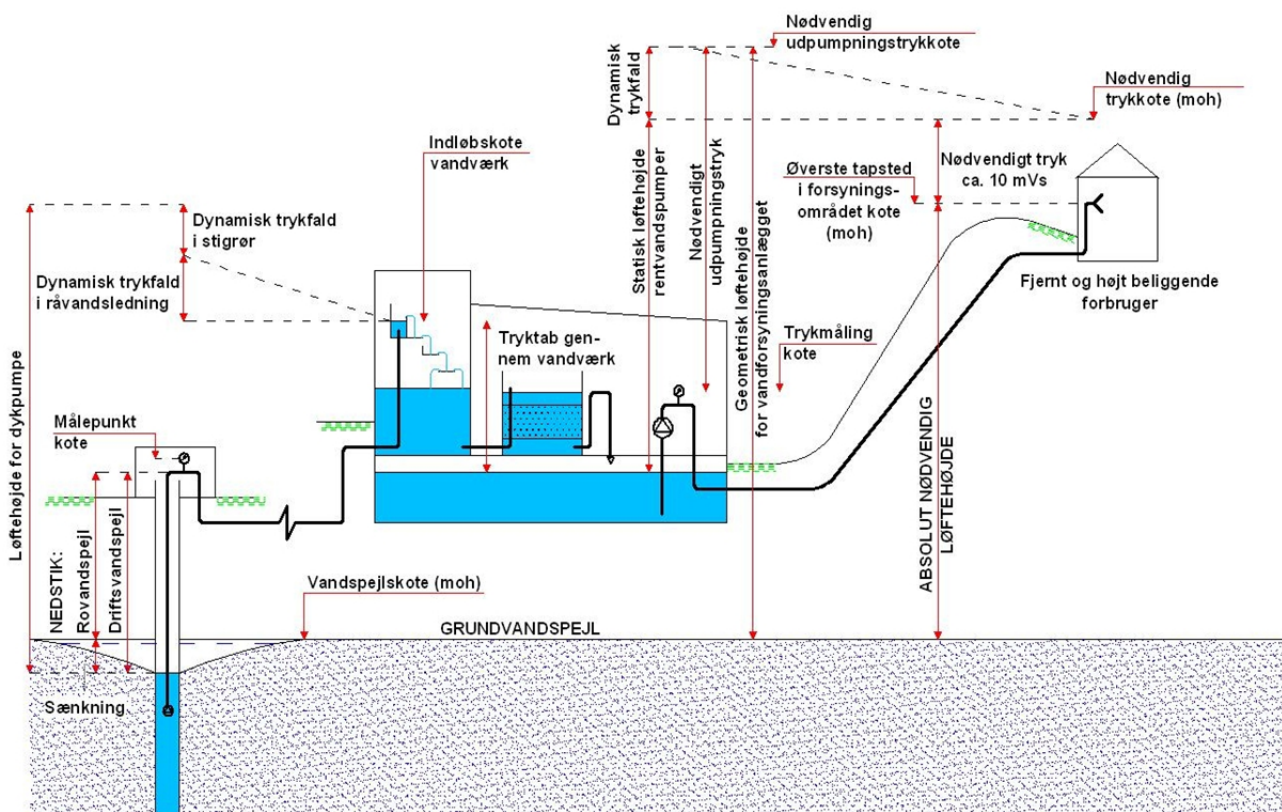


Figur 3: Specifikt energiforbrug for vandværker i Lejre kommune vs. årsudpumpningen.

Et kort blik på energiforbruget på vandværker i Lejre, jf. figur 3, afslører at de også i grove træk følger den i figur 1 skitserede sammenhæng. Den fuldt optrukne kurve repræsenterer de samme tal, som kurven i figur 1. Det ses også at alle værker, bortset fra det mindste, har en potentiel forbedring i sigte. Det lidt overraskende resultat for det mindste værk skyldes sandsynligvis en registreringsfejl men kan uanset være interessant at undersøge.

Vandværkets elementer

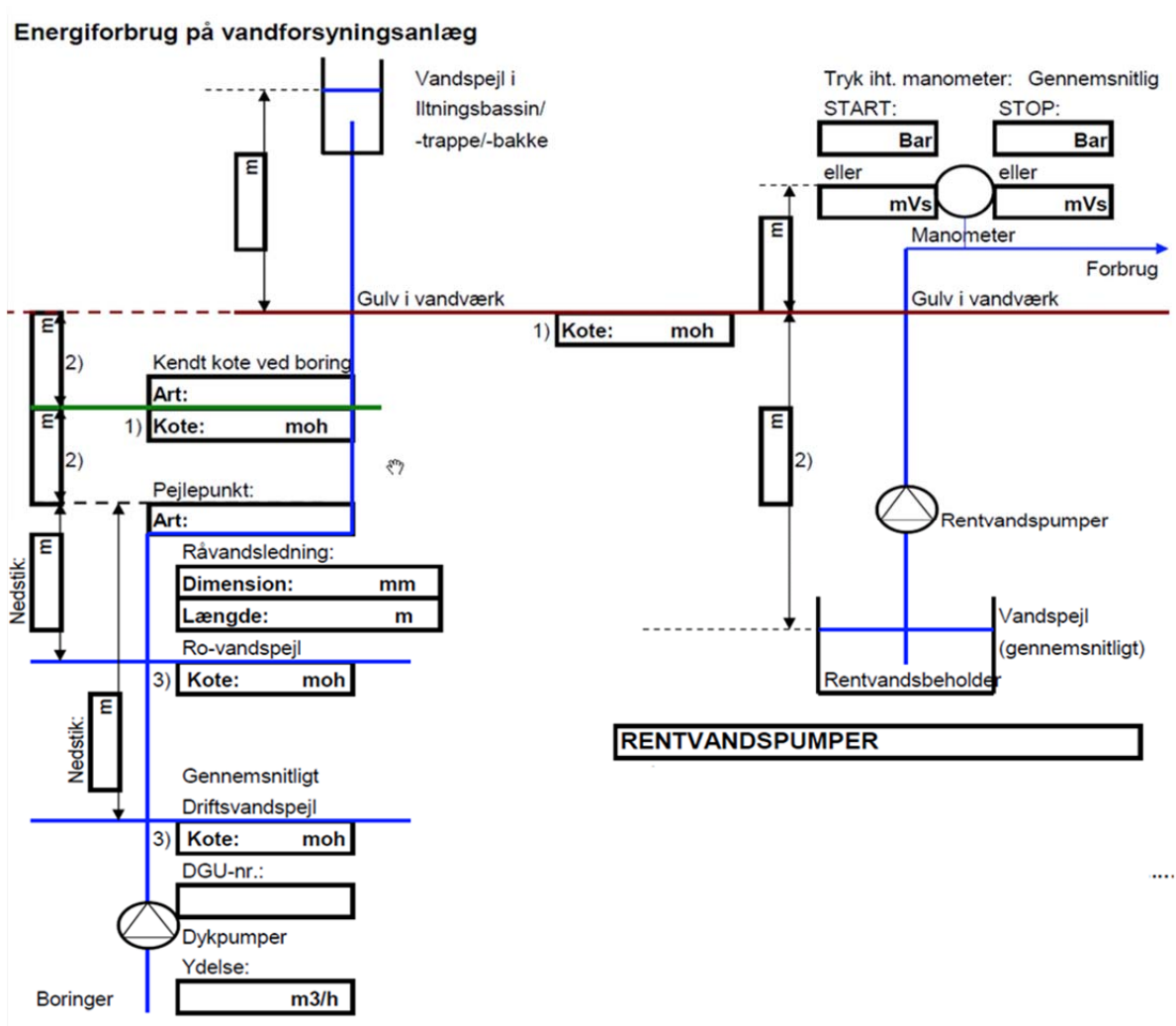
Et vandværk består typisk af nogle få grundelementer: Oppumpning fra boringen, iltning, filtrering, opmagasinering i rentvandstank og udpumpning til forbrugerne. Ud over at vandet skal løftes til et højere niveau, vil der også være strømningsmodstand i rør og filtre mm., som på den ene eller anden måde overvindes af de pumper, der bruges. Som vist i figur 4 kan alle disse elementer udtrykkes på samme måde ved et (mod)tryk, der igen kan udtrykkes som trykket af en vandsøjle, dvs. meter vandsøjle (mVs). Dette er da også er den trykenhed, der sammen med højdekoterne (moh) bliver brugt i beregningerne. Jævnfør i øvrigt med dokumentet om tryk og trykkoter i rapporten. Selv om figur 4 ikke vil blive gennemgået i detaljer, skal det kort nævnes at figuren illustrerer, at både indvindingspumpe og rentvandspumpe skal have en større løftehøjde end svarende til den fysiske højdeforskel de respektive steder, da de også skal overvinde strømningsmodstanden, det såkaldte dynamiske trykfald.



Figur 4: Principskitse af et vandværk med fokus på vandets løftehøjde og strømningsmodstand fra grundvand til forbruger.

Dataindsamling

Bagest i rapporten, appendiks 1, ses et registreringsskema, som indeholder oplysninger og data, som skal anvendes til beregningerne. For at undgå misforståelser og "skjulte" regnefejl undervejs er skemaet udformet, så kun de korrekte enheder (mVs, moh, m³/h, kWh m.v.) bliver anvendt til beregningerne. Skemaet kan udvides efter behov til at omfatte drift af flere pumper, filtre m.v. De fleste af disse data anvendes ved udfyldning af skemaet, der er vist i figur 5, og benyttes til de indledende beregninger af energiforbruget på vandværker. Figur 5 omfatter oppumpning, iltning, filtrering og udpumpning i et vandværk.



Figur 5: Tegning af hovedprocesserne i et vandindvindingsanlæg med rubrikker til notering af de nødvendige data for beregning af energiforbruget på anlægget.

Man har brug for at kende højdekoterne for både boring, vandværk og det højest beliggende forbrugssted. Hvis de ikke er kendt på forhånd, kan man enten kontakte en landmåler for at få udført målingerne; men man kan også med rimelig nøjagtighed benytte de terrænkoter, der findes på geodatastyrelsens (GST) hjemmeside (<http://www.gst.dk/Sepaakort/>). De fleste data for vandværkets borer, f.eks. boringsdybder, findes i JUPITER databasen på GEUS hjemmeside (<http://www.geus.dk/DK/data-maps/jupiter/Sider/vandkvalitet-dk.aspx>) ved hjælp af vandværkets navn eller i (<http://data.geus.dk/JupiterWWW/index.jsp>) ved hjælp af indvindingsboringens nummer. Højder for driftsvandspejl, der selvfølgelig er det mest korrekte at benytte, og for rolandspejl, der alternativt kan bruges, findes ved hjælp af pejlinger i boringen.

Data for både indvindingspumpers og rentvandpumpers ydelser skal svare til de faktiske ydelser, når pumperne leverer vand. Man kan f.eks. ikke benytte en gennemsnitsværdi for indvindingspumpen, hvis den kører i intervaldrift. Øvrige data fås generelt fra manualerne for de enkelte komponenter, eller hos producenten.

Det kan desuden være fordelagtigt at lave en skitse over vandværkets ledningsnet, hvorpå man noterer længder og rørdimensioner i de forskellige områder. Dette bruges til at vurdere, om udpumpningstrykket er optimalt og er ikke nødvendigt for at gennemføre den første beregning af indvindingsanlæggets energiforbrug; jf. tegningen i figur 5.

Beregninger

Som nævnt går det ud på at omregne alle "modstande" pumperne skal overvinde, dvs. højdeforskelle og tryktab som følge af vandets strømning, til en samlet modstand, som vi her betegner løftehøjden og måler i meter vandsøjle (mVs). Når dette er på plads, summeres alle disse løftehøjder og indsættes sammen med det samlede energiforbrug i formel nr. 1, der som resultat vil give virkningsgraden. Formlens indhold og forkortelser er vist i den indrammede kasse under formlerne 1-2. Den således beregnede virkningsgrad (V) indsættes derefter i formel 2 sammen med den teoretisk opnåelige virkningsgrad (V_0), man kan aflæse på figur 1 ud for tallet for den årligt udpumpede vandmængde, og giver så nyttevirkningen i procent.

$$V = 100 \times \frac{9,81}{3600} \times \frac{Q \times H}{E} \quad \text{(Formel 1)}$$

$$V_{ef} = 100 \times \frac{V}{V_0} \quad \text{(Formel 2)}$$

V -	virkningsgraden i procent		
V_0 -	den teoretisk opnåelige virkningsgrad i procent		
Q -	vandmængden for perioden [m^3]	ELLER	aktuel vandstrøm [m^3/h]
H -	løftehøjden [mVs]		
E -	energiforbruget for perioden [kWh]	ELLER	aktuel effekt [kW]

Formel 1 er generel og kan bruges for hele vandværket såvel som for sektioner og enkelte dele. Formel 2 bruger data for den teoretisk opnåelige virkningsgrad, der er sammensat af løftehøjderne for alle komponenterne i et vandindvindingsanlæg og vil derfor kun give mening ved en tilsvarende beregning af nyttevirkningen for indvindingsanlægget svarende til løftehøjderne i figur 5. For eksempel vil strømningsmodstanden i rørledningerne udelades i denne indledende beregning.

Udregningerne ved formlerne 1-2 er forholdsvis ukomplicerede, og det svære ligger da også tidligere i processen, når højdekoter, trykvisninger, strømningsmodstand i rør og filtre skal omregnes til tryk (mVs). Modstanden i lukkede filtre beregnes lettest ved at aflæse tryktabet over filteret, når det er i drift og om nødvendigt omregne dette til meter vandsøjle ved hjælp af formel 3, hvori ΔT betegner tryktabet i Bar. Er dette ikke muligt, kan man estimere trykfaldet ved hjælp af fabrikantens datablad og kendskabet til strømningshastigheden i filteret. Strømningshastigheden findes ved at dividere vandmængden (m^3/t) med filterets tværsnitsareal (m^2).

$$H = 9,81 \times \Delta T \text{ (bar)} \quad \text{(Formel 3)}$$

Beregning af strømningsmodstanden i rør og vandledninger kan ske ved at indsætte data i det medfølgende regneark, "Tryktab i ledninger", men er det ikke muligt, vil man kunne benytte fremgangsmetoden, der er beskrevet i appendiks 3.

Til illustration af principperne for beregning af virkningsgrad og effektivitet foretages nedenstående en gennemregning af et tænkt eksempel.

Tabel 1: Data fra et mindre vandværk, som er brugt i gennemregningen af eksemplet.

Kote for rolandspejl (driftvanspejl kendes ikke)	-1	moh
Kote ved pejlepunkt	4,2	moh
Kote ved terræn omkring boring	5	moh
Kote for gulv i vandværk	19,7	moh
Kote for rentvandstank	21,4	moh
Kote for filter/beluftning	21,8	moh
Koten for udpumpningsmanometeret	20,7	moh
Råvandsledning, dimension	63	mm
Råvandsledning, længde	350	m
Modtryk i filter	5	mVs
Råvandspumpe, effektforbrug	2,2	kW
Råvandspumpe, ydelse	3	m^3/h
Rentvandspumpe, effektforbrug	2,2	kW
Rentvandspumpe, ydelse	8	m^3/h
Rentvandspumpe, modtryk	25	mVs
Rentvandspumpe, årlig udpumpning	6860	m^3
Årligt elforbrug	7952	kWh

Først beregnes den samlede løftehøjde fra rovandspejl til højest liggende punkt, der er filterindløbet: $21,8 - (-1) = 22,8$ mVs og filtreringsmodstanden tages direkte fra tabellen: 5 mVs Da rentvandstanken ligger under filterindløbets niveau og ellers står på samme niveau som filteret, adderes kun modtrykket ved udpumpning: 25 mVs

Dette giver en samlet løftehøjde $H = 52,8$ mVs, der indsættes i formel 1 sammen med energiforbruget og den udpumpede vandmængde. Herefter kan virkningsgraden beregnes:

$$V = 100 \times (9,81/3600) \times (6860 \times 52,8)/7952 = 12,4\%$$

Den ideelle virkningsgrad for et vandværk af den størrelse er ca. 33%, jf. figur 1, hvilket giver en nyttevirkning for dette værk på

$$V_{\text{eff}} = 100 \times 12,4/32 = 37,6\%$$

De samme beregninger kan udføres ved at indføre data i det regneark, der hedder "Energirapport", og metodikken vil nu blive gennemgået med brug af data fra tabel 1. Efter at have udfyldt første ark (*Forside*) i regnearket vil man kunne indtaste data i de følgende ark (*Vandværksoversigt*, *Boringsdata & Aflæsninger*). Inden dette er gjort, vil der stå #REF! i en del af cellerne. Det skal man ikke søge at rette, men afvente at resultaterne fremkommer efter endt indtastning.

Startende med *Boringsdata* indtaster man for hver boring talværdierne for sit fikspunkt, f.eks. koten ved pejlepunktet (4,2) og afstanden herfra til rovandspejl (5,2) eller driftsvandspejl, hvis man kender det. Resultatet bliver rovandsspejlets kote (eller driftsvandspejls-koten), der automatisk kopieres til arket *Vandværksoversigt* og bruges i beregningerne.

Nu går man videre med indtastning i arket *Vandværksoversigt*, hvor der er brug for gulvkoten i vandværket (19,7), afstand mellem gulv og udpumpningsmanometer (1), tryktabet gennem vandværket (5), årsudpumpningen (6860) og den aktuelle kWh-pris.

Endelig indtastes aflæsningerne for elforbruget, vandudpumpningen og udpumpningstrykket i arket *Aflæsninger*. Bruges eksemplets data skal der i første række indtastes en starttid (som i dette tilfælde er 01-01-2013 00:00), elmåler aflæsning (0), skønnet elforbrug til lys mm. (0), vandmåler aflæsningen (0) og manometervisningen (25). I næste række indtastes data for slutningen af perioden (01-01-2014 00:00), elmåler aflæsning (7952), skønnet elforbrug til lys mm. (0) vandmåler aflæsningen (6869) og manometervisningen (25).

Nu vil man så kunne se, at alle de felter, hvori der tidligere stod #REF!, er udfyldt med meningsfulde tal, ligesom der er kommet punkter og søjler i diagrammerne på de tre ark: *Forside*, *Vandværksoversigt* og *Nøgletal*. Vandværkets virkningsgrad beregnes her til 12% og nyttevirkningsgraden til 36%. Forskellen til de ovenfor beregnede tal skyldes afrunding i regnearket.

Flere indtastninger i *Aflæsninger* kan bruges til at følge udviklingen i værkets energiforbrug over tid.

Bedømmelse af resultatet for virkningsgraden

Med erfaringen fra figur 3 in mente vil de fleste vandværker, som det mindre vandværk i eksemplet ovenfor, komme frem til, at der er et besparelspotentiale, som det nu ville være interessant at få identificeret mere detaljeret, så man kan afgøre, om det er værd at forfølge eller ej.

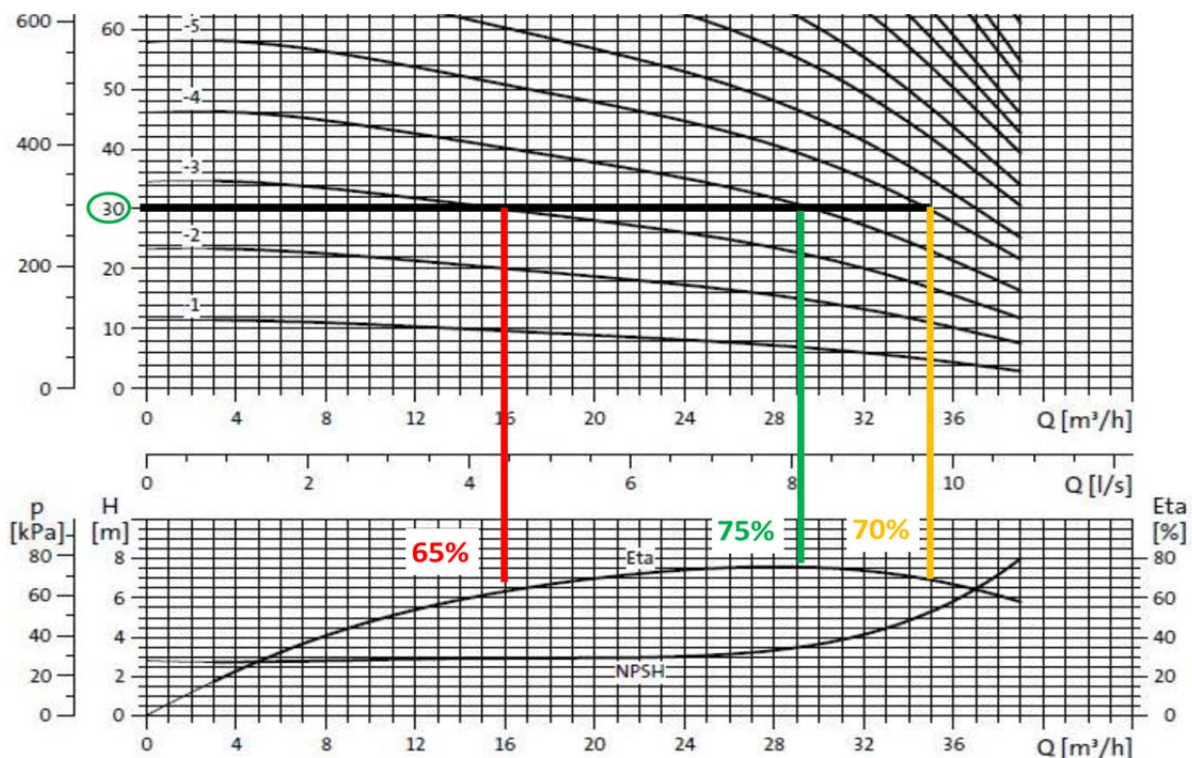
Råvandsledningen

I eksemplet ovenfor kunne man forestille sig, at der kunne være en væsentlig strømningsmodstand i råvandsledningen. Beregningen af strømningsmodstand ved hjælp regnearket "Tryktab i ledninger" og med data i tabel 1 giver værdien: 1,3 mVs. Beregningen ved hjælp af formlerne i appendiks 3 giver 1,5 mVs. Dette udgør ca. 2,5% af den samlede løftehøjde, som er fremkommet ved de indledende simple beregninger. For at verificere om tryktabsberegningen nogenlunde passer til det tryktab, man reelt har, bliver man nødt til at måle vandtrykket ved indvindingspumpen eller skønne et tryk ud fra indvindingspumpens karakteristik. Selv om det skulle vise sig, at der er et forholdsvis stort tryktab i råvandsledningen, ville det nok alligevel ikke være rentabelt at udskifte ledningen, men man har så fået identificeret en af de faktorer, der nedbringer virkningsgraden, samt fået et skøn over hvor stor betydning netop denne faktor har.

Centrifugalpumper til råvand og udpumpning.

De store energiomsætninger i et vandværk er normalt knyttet til forbrug i pumperne og det er oplagt at spørge sig, om pumper, filtre og ledninger passer til vandværkets aktuelle produktion. Disse komponenter har generelt lang levetid, kan være slidte, installeret på et tidspunkt, hvor værkets produktion var større eller fordi man har ønsket at etablere en reservekapacitet. Svaret på dette spørgsmål vil derfor afhænge af mange og modsatrettede faktorer, fremtidsperspektiver m.m., og det vil føre for vidt at skulle redegøre for alle aspekter her. I stedet gennemgås hvorledes man ud fra et ønske om optimering af energieffektiviteten kan vurdere om et aktuelt driftspunkt for en pumpe er optimalt, og hvorledes tiltag som drøvling og installation af frekvensstyring vil påvirke energiforbruget i en pumpe.

I nedenstående Figur 6 ses, at man for fastholdt løftehøjde, 30 mVs, vil opnå forskellige virkningsgrader afhængigt af den mængde, man ønsker at udpumpe. Det betyder på den ene side, at man ved at lokalisere driftspunktet for en given pumpe i anlægget kan se om den arbejder i et hensigtsmæssigt område, hvor virkningsgraden er høj ($\text{Eta} > 70\%$), og på den anden side at man kan vælge sin pumpe, så den både opfylder kriteriet om en bestemt løftehøjde, kapacitet og samtidig arbejder effektivt.



Figur 6: Pumpekaraktistik for en Grundfos SP30 pumpe, som kunne være anvendt som indvindingspumpe. Figurens øverste del viser løftehøjden (mVs og kPa) som funktion af udpumpet mængde, Q (m³/h og l/s) ved forskellige omdrejningshastigheder (de krumme linjer) og nederste del viser virkningsgraden, Eta (%) og ansugningstrykket, NPSH, som funktion af udpumpet mængde.

I Figur 7 vises pumpekaraktistikken således, at man kan se hvordan virkningsgrad, løftehøjde og kapacitet varierer med omdrejningstallet. Pumpen yder maksimalt 14,8 m³/h, og vi vil nu se på energiforbruget, hvis man vælger at reducere kapaciteten gennem drøvling eller ved hjælp af reduktion af omdrejningstallet, en frekvensregulering. Drøvling er normalt en billig løsning, idet man blot lukker delvist for en ventil, der oftest sidder i anlægget alligevel, og frekvensregulering er noget dyrere, da man både skal købe og installere en regulator.

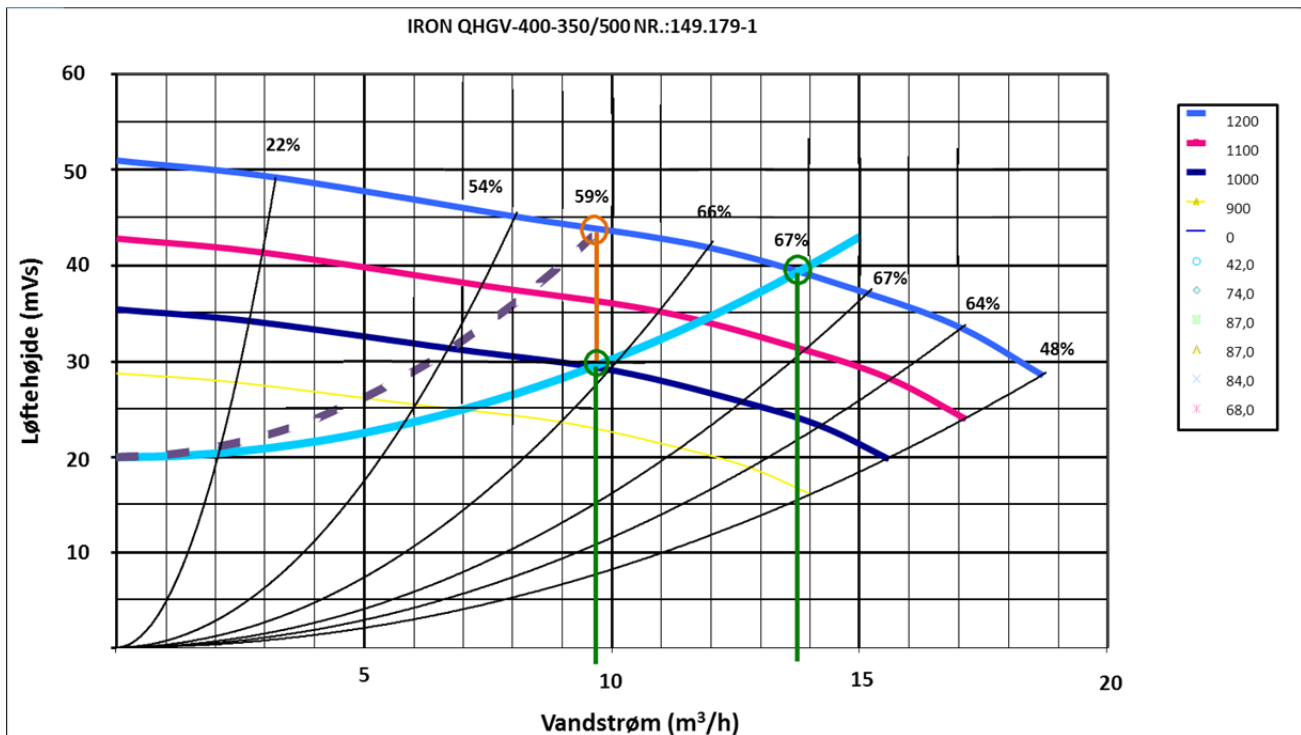
Man beregner pumpens effekt, P, ved hjælp af formel 4:

$$P = \frac{9,81}{3600} \times \frac{Q \times H}{V} \quad \text{Formel 4}$$

Hvor kapaciteten/ydelsen, Q, og løftehøjden, H, har samme betydning som i formel 1. Virkningsgraden, V, fås af pumpekaraktistikken, jf. Figur 7. Eksempelvis vil en beregning af pumpeeffekten som følge af drøvling og frekvensregulering blive hhv.:

$$P(\text{drøvling}) = (9,81/3600) * (9,6*43)/0,59 = 1,9 \text{ kW}$$

$$P(\text{frekvensregulering}) = (9,81/3600) * (9,6*30)/0,66 = 1,2 \text{ kW}$$



Figur 7: Pumpekaraktistik, som ved den lyseblå kurve viser hvorledes pumpens virkningsgrad (opadbuede sorte linjer), kapacitet og løftehøjde varierer med omdrejningstal (nedadbuede farvede linjer). Pumpen yder maksimalt 14,8 m³/h, men vi ønsker at reducere kapaciteten til 9,6 m³/h. Det kan ske ved drøvling af pumpen, der så følger den stiplede linje, eller ved reduktion af omdrejningstallet (frekvensregulering).

Det specifikke energiforbrug, kWh/m³, fås ved at dividere effektforbruget med ydelsen (9,6 m³/h).

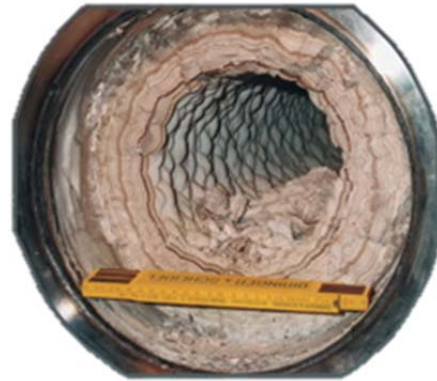
Beregnes tal for driftspunkterne i Figur 7, fås resultaterne som er samlet i Tabel 2. Det ses her, at drøvling medfører et markant højere specifikt energiforbrug i forhold til tilpasningen af kapaciteten ved hjælp af frekvensregulering, idet det specifikke energiforbrug efter drøvling ligger ca. 2/3 over det specifikke energiforbrug efter frekvensregulering. Drøvling har derfor som enkeltstående faktor direkte og markant indflydelse på nyttevirkningen af et anlæg.

Tabel 2: Specifikke energiforbrug beregnet efter tilpasning af pumpekapaciteten ved drøvling og frekvensregulering i henhold til pumpedata vist i figur 7.

Driftspunkt	Effektforbrug, kW	Specifikt energiforbrug, kWh/m ³
Fuld ydelse (14,8 m ³ /h)	2,41	0,16
Drøvlet ydelse (9,6 m ³ /h)	1,90	0,20
Frekvensreguleret ydelse (9,6 m ³ /h)	1,19	0,12

Drøvling, som finder anvendelse på både udpumpning og på indvinding, kan på mange måder sammenlignes med de tryktab, som delvist tilstoppede ledninger giver anledning til, jf. Figur 8. I et mindre vandværk vil man som oftest lade tingene gå sin skæve gang, indtil det bliver nødvendigt at udskifte eller renovere på grund af en utilstrækkelig kapacitet, hvorimod større værker med større energiforbrug ofte har indført rensningsprocedurer, som sikrer, at rørens indre overflade holdes nogenlunde glat og fri for aflejringer.

Strømningsmodstanden stiger dog markant som følge af selv en mindre stigning i overfladeruheden, hvilket illustreres af tallene i Tabel 3. Her ses at en ruhed på 0,5 mm, som ikke er ualmindelig i rørsystemer, vil afføde et væsentlig højere energiforbrug (63%) end hvad er nødvendigt for nye rør i samme dimensioner og kapacitet.



Figur 8: Aflejringer i stålledning

Tabel 3: Strømningsmodstand og tilhørende energiforbrug for pumpning af vand i rør med forskellige overfladeruheder, Øllgaard 2014.

Ruhed	0,01 mm (nye rør)	0,03 mm	0,1 mm	0,5 mm
Modstand	9,86 mvs	10,3 mvs	11,6 mvs	16,1 mvs
Stigning i energiforbruget	-	4,5 %	17,7 %	63,3 %

Øvrige forhold

Til slut gives et par eksempler på andre steder, hvor man typisk vil kunne finde overforbrug af energi, som vil reducere et værks nyttevirkning:

Indvindingen: Utætte stigrør, underdimensioneret råvandsledning, underdimensioneret eller slidt pumpe

Iltning og filtrering: For høj indløbskote, overdimensioneret ilt/vand-forhold, overdimensioneret kompressor, for stort tryktab i filtrene, uhensigtsmæssig skyllemængde eller skylleprocedure.

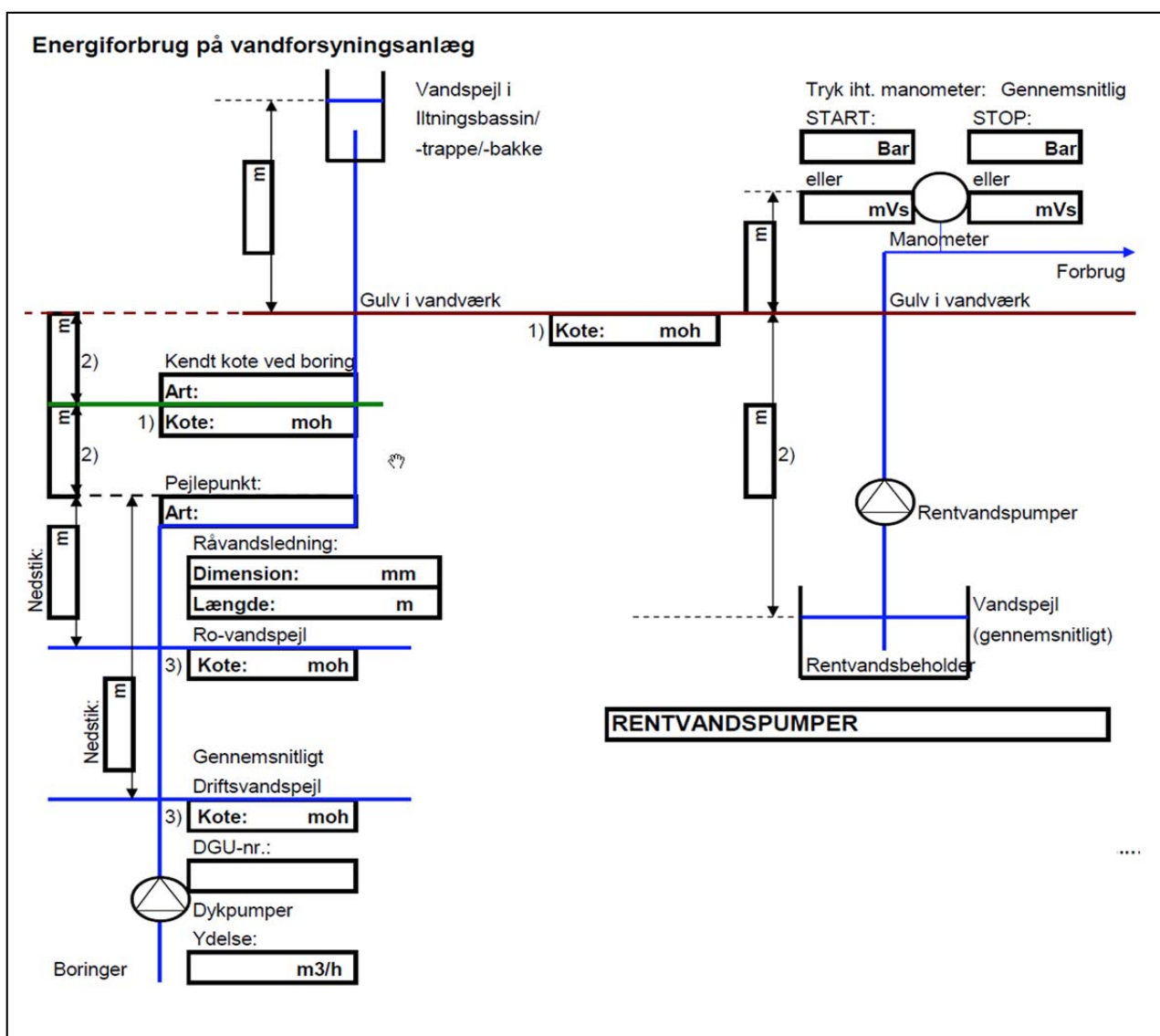
Udpumpningen: Faldende pumpekapacitet (slid), for tidligt eller for sent pumpeskift, pumpen arbejder uden for optimalt arbejdsområde.

Appendiks 1: Teknisk registreringsskema for vandværker

VANDVÆRKET GENERELT (navn)				
Indvunden mængde per år, m ³ /år				
Udpumpet mængde per år, m ³ /år				
Elforbrug per år kWh/år Hovedmåler				
Elforbrug per år kWh/år Bimåler				
Maks døgnforbrug, m ³ /døgn				
Maks timeforbrug, m ³ /time				
Udpumpningstryk, mVs				
- Alternativt udpumpningstrykkote, moh				
Kote til gulv, moh				
Kote til indpumpning på vandværk, moh				
BORINGER (for hver boring)				
Vandspejlkote, moh				
Driftspejl, moh				
Råvandspejl, moh				
Pejlepunkt kote, moh				
Pumpemodel				
Løftehøjde, mVs				
- ved ydelse, m ³ /time				
Gennemsnitlig døgnkapacitet, m ³ /døgn				
Skønnet driftstid, timer per døgn				
Frekvensreguleret (j/n)				
Motorstørrelse, kW				
Råvandsledning dimension (evt. ledningsplan)				
FILTER				
Filtreringsmetode (åben/lukket)				
Antal				
Model				
Maks. Kapacitet, m ³ /time				
Filterareal, m ²				
Tryktab: Modtryk, mVs				
- ved vandmængde, m ³ /time				
Filterskyl hyppighed, per m ³ eller per tid				
KOMPRESSOR				
Model				
Nominel effekt, kW				
Skønnet driftstid, timer per uge				

RENTVANDSPUMPER (for hver pumpe)			
Model			
Pumpestørrelse: Løftehøjde, mVs			
- ved ydelse, m ³ /time			
Motorstørrelse, kW			
Frekvensreguleret (j/n)			
Skønnet driftstid, timer per døgn			
Kote for top af vandspejl i rentvandsbeholder, moh			
Kote for vandspejl i bund af rentvandsbeholder, moh			
Kote til manometer, moh			
SKYLLEVANDSPUMPER			
Model			
Pumpestørrelse: Løftehøjde, mVs			
- ved ydelse, m ³ /time			
Motorstørrelse, kW			
Frekvensreguleret (j/n)			
Skønnet driftstid, timer per døgn			
ANDET UDSTYR			
Energiforbrug, Varmtvandsbeholder, kW/år			
Affugter, nominel effekt, kW			
- Fugtstyret (j/n)			
- Skønnet driftstid, timer per døgn			
Myggefanger, kW			
Ventilatorer, nominel effekt, kW			
- Styringsreguleret (j/n)			
- Skønnet driftstid, timer per døgn			
Elvarme, nominel effekt, kW			
- Styringsreguleret (j/n)			
- Skønnet driftstid, timer per døgn			
- Opvarment areal, m ³			
- Rumtemperatur, °C			
Eltracering, (boring) Nominel effekt, kW			
- Skønnet driftstid, timer per døgn			
LEDNINGSNETTET			
Maks strømningshastighed, m/s			
Forsyningsområdets maks. Kote, moh			
Højest beliggende tapsted, moh			
Ledningsplan med dimensioner (medbringes/vedlægges)			
ANDET			

Appendiks 2: Skematisk figur over indvindingsanlægget i et vandværk med angivelse af de data, der er benyttet til beregningerne.



Appendiks 3: Beregning af tryktab ved væskestrømning i rør

Ved lave hastigheder, som f.eks. kan optræde i forsyningsanlægget, vil væskestrømningen i et rør være laminar og trykfaldet fra friktion vil i dette tilfælde være proportionalt med hastigheden og dermed masseflowet.

For runde lange rør (Poiseuille strømning) gælder at trykfaldet (trykforskellen mellem ind- og udløb) $p_{f,l}$ vil være lig

$$p_{f,l} = (Q \cdot 8 \eta L) / (\pi R^4) \quad 3.1$$

hvor Q er volumen-strømningshastigheden (m^3/s), R er rørets radius (m), L dets længde (m), η er væskens dynamiske viskositet ($Pa \cdot s$) og π er forholdet mellem en cirkels omkreds og dens diameter ($22/7$).

Ved større hastigheder, som almindeligvis optræder i indvindingsanlægget, bliver strømningen turbulent og trykfaldet fra friktion tilnærmet proportionalt med strømningshastigheden i anden potens.

$$p_{f,t} = Q^2 (R_t / \rho^2) \quad 3.2$$

hvor ρ er væskens massefylde (kg/m^3). For at finde proportionalitetsfaktoren, R_t , må man bruge opslagsværker, men for runde lange rør kan trykfaldet under turbulent strømning også beregnes ud fra

$$p_{f,t} = (f_d \rho Q^2 \cdot 8 L) / (\pi^2 D^5) \quad 3.3$$

hvor D er rørdiameteren ($D = 2R$) og f_d er Darcy's friktionsfaktor, der kan findes i et såkaldt Moody diagram, jf. figur 3.1, som funktion af Reynolds tal og den relative ruhed, ε/D , der er ruheden, ε , delt med rørdiameteren.

Trykket i ligning 3.3 omsættes til meter vandsøjle. ($1 Pa = 0,00010197 mVs$)

Reynolds tal er defineret ved

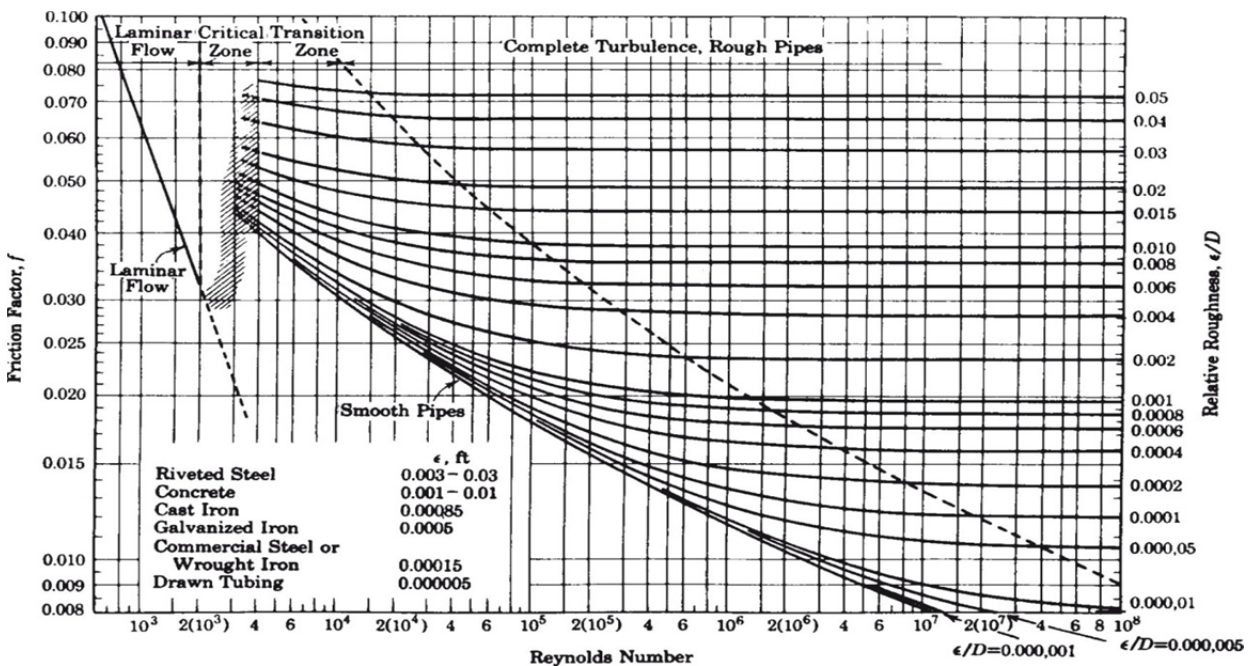
$$Re = D \rho v / \mu \quad 3.4$$

Hvor v betegner væskens hastighed (m/s). Overgang fra laminar strømning til turbulent sker omtrentlig når Reynolds tal overskrider $Re_{krit} \sim 2300$ og en beregning af Re kan altså vise hvilken friktionsform der vil være dominerende og hvilken formel man skal benytte til beregning af tryktab.

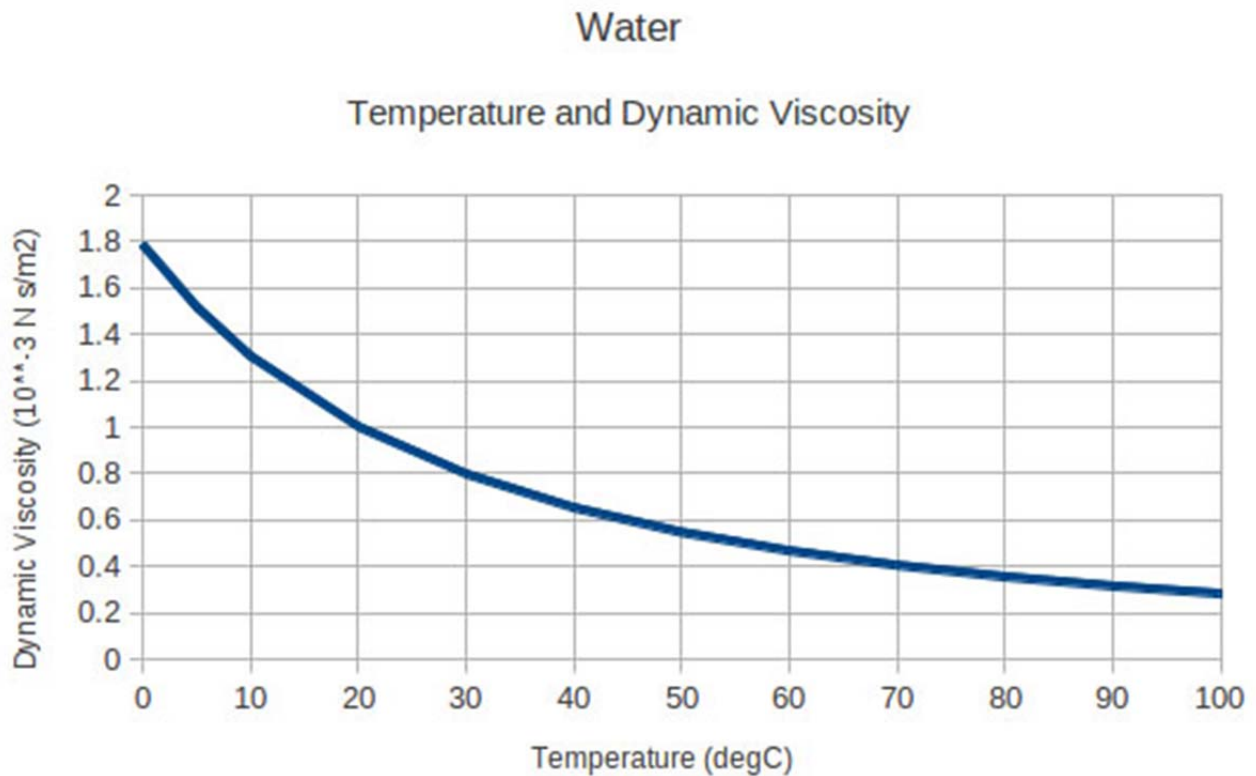
Reynolds tal beregnes også ud fra mere gængse tal for volumen-strømnings-hastigheden Q (m^3/h) ved følgende formel

$$Re = Q \rho / (900 \pi R \mu) \quad 3.5$$

Foruden af Moody-diagrammet kan Darcy's friktionsfaktor også findes ved den empiriske formel: $f_d = 1.325 / (\ln[\epsilon/3.7D + 5.74/Re^{0.9}])^2$ 3.6



Figur 3.1 Darcy friktionsfaktor, f_d , som funktion af rørdiameter, Reynolds tal og relative rør-ruhed,
 Ref: A.J. Chapman, Heat Transfer, Macmillian Publishing Company, New York, 4th edition, 1984.



Figur 3.2 vands dynamiske viskositet som funktion af temperaturen.

Vandets dynamiske viskositet er afhængig af temperaturen, jf. Figur 3.2
Ved stuetemperatur er den 1 cPa*s men vil være 1,31 cPa*s ved 10°C, som nok er en mere realistisk værdi at benytte, når man vil beregne tryktab i vandledninger, som ligger i jorden.