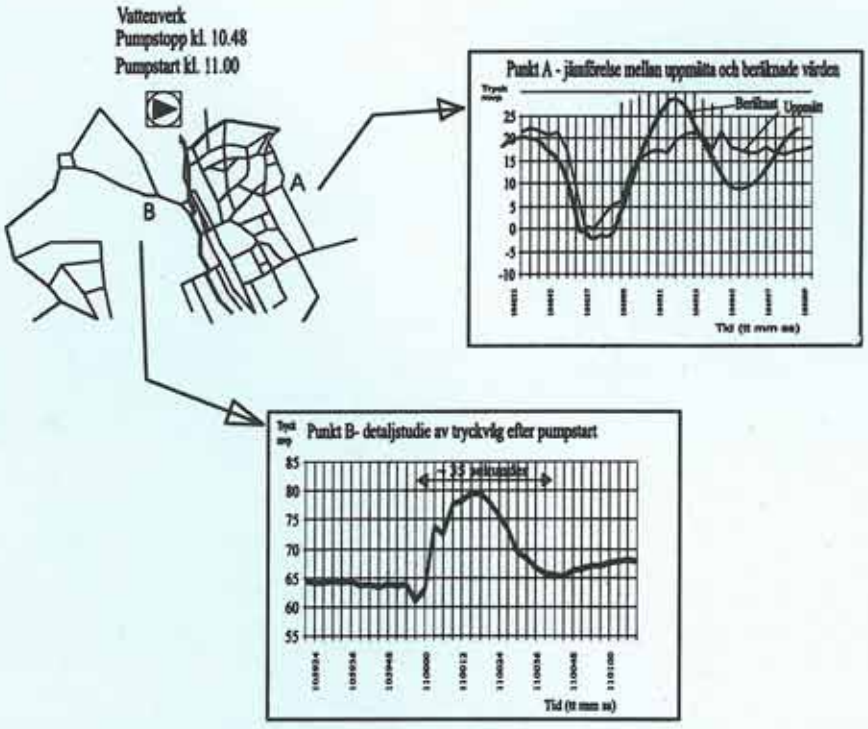
Tryckslag i vattenledningsnät – några exempel

Johan Spännare



VA-FORSK RAPPORT 1998 • 01

Utgiven av VAV AB

VA-FORSK

VA-FORSK är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är frivillig och intresset från kommunernas sida har varit mycket stort. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-FORSK initierades gemensamt av Kommunförbundet och VAV. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvattenrening
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

VA-FORSK styrs av en kommitté, som utsetts gemensamt av VAV och Kommunförbundet. Kommittén är underställd VAVs styrelse. Under perioden 1996-1998 har kommittén följande sammansättning:

Hans Mattsson, ordförande	Södertälje
Professor Peter Balmér	GRYAAB, Göteborg
Driftchef Sture Bergström	Gatukontoret, Skellefteå
Enhetschef Bengt Göran Hellström	Stockholm Vatten AB
Kommunalråd Nina Jarlbäck	Eskilstuna
Tekn chef Peeter Maripuu	Lysekil
Ledamot i KS o KF Håkan Mattsson	Ystad
Ledamot i KS Åsa Möller	Sundsvall
VA-chef Bengt L Persson	VA-verket Malmö
Sektionschef Jan Söderström	Sv kommunförbundet
VD Håkan Westerlund	VAV
Forskningschef Jan Falk, sekreterare	VAV

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande VAVs ståndpunkt.

VA-FORSK
VAV AB
101 53 STOCKHOLM
Tel: 08-677 25 70
Fax: 08-677 25 75

Servicebolag till Svenska Vatten- och Avloppsverksföreningen

Tryckslag i vattenledningsnät – några exempel

Johan Spännare

VA-FORSK RAPPORT 1998•01

Utgiven av VAV AB

VA-FORSKs rapportserie

Rapportens titel:	Tryckslag i vattenledningsnät – några exempel
Title of the report:	Extreme pressure variations within distribution systems – some examples
Rapportens beteckning Nr i VA-FORSK-serien:	1998-1
ISSN-nummer:	1102-5638
ISBN-nummer:	91-88392-45-7
Författare:	Johan Spännare, VBB VIAK, Stockholm
Utgivare:	VAV AB
VA-FORSK projekt nr:	95-129
Projektets namn:	Tryckslag i vattenledningsnät - Exempelsamling
Projektets finansiering:	VA-FORSK
Rapporten beställs från:	AB Svensk Byggtjänst, Litteraturtjänst, 113 87, Stockholm, tfn 08-457 11 00
Rapportens omfattning Sidantal:	52
Format:	A4
Upplaga:	1200
Sökord:	Tryckslag, tryckvariation, tryckmätning, LICWATER, pump, ventil, vattenledningsnät
Keywords:	Water hammer, pressure variations, pressure measurements, LICWATER, pump, valve, water distribution system

Sammandrag:

Rapporten beskriver problemet med stora tryckvariationer i vattenledningsnät. Fyra exempel redovisas där datorprogram har använts för att beräkna variationerna.

Abstract:

The report describes the problem with large pressure variations within water distribution systems. Four examples are presented where computer programs have been used to calculate the variations.

Målgrupper:	Kommuner Konsulter
Utgivningsår:	1998
Pris 1998:	125 kr, exkl moms

SAMMANFATTNING

Oönskade tryckvariationer förekommer i större eller mindre utsträckning i nästan alla VA-anläggningar. Problemen med stora tryckvariationer har framförallt uppmärksammats i avloppsanläggningar. Problemen har i sådana fall varit uppenbara. Konstruktionsdelar har gått sönder och ledningsbrott inträffat till följd av för stora tryckvariationer. På senare tid har dock problemen börjat uppmärksammas även i vattenledningsnät, vilket framförallt denna rapport syftar till att belysa.

Höga tryck, s.k. tryckslag, kan uppkomma vid till- och frånslag av pumpar eller snabba ventilrörelser. Tryckslag kan orsaka skador på anläggningens olika konstruktionsdelar och i kombination med andra faktorer förorsaka ledningsbrott. På motsvarande sätt kan även mycket låga tryck förekomma. Framförallt hastiga pumpstopp och ventilstängningar orsakar kraftiga negativa tryckvågor som t.o.m. kan understiga atmosfärstrycket, dvs undertryck i ledningen sker. Detta kan i värsta fall leda till insugning av partiklar och förorenat vatten utifrån om otäta fogar finns på ledningen.

Den närmast explosionsartade utvecklingen på datateknikområdet de senaste åren har bidragit till att datorstödda beräkningsmetoder har blivit allt vanligare för att påvisa tryckvariationer. Följande rapport belyser hur man med hjälp av datorprogram kan beräkna och påvisa tryckslagsfenomen i hela ledningsnät. Rapporten kan i stort sägas omfatta följande :

❒ Inledande avsnitt med en allmän beskrivning av orsaker till tryckslag och tryckvariationer. Dessutom behandlas praktiska gränsvärden för tryck, tryckmätningar, skyddsanordningar mot tryckslag, samt beräkningsmetoder och datorprogram.
❒ Två enkla beräkningsexempel presenteras med en resultatdiskussion
❒ Två beräkningsexempel som omfattar vattenledningsnäten i Falun och Finspång. Genomförda mätningar beskrivs i detalj, sedan hur dessa användes för bl.a. verifiering av resultaten. Resultaten presenteras och analyseras slutligen, och tänkbara åtgärder diskuteras.
❒ I ett avslutande avsnitt beskrivs strukturen på det datorprogram, LICWATER Dynamisk, som använts för att beräkna de fyra exemplen. Dessutom beskrivs kortfattat andra datorprogram tillgängliga på marknaden.

De presenterade exemplen visar tydligt på att man med hjälp av datorprogram och mätningar, förutom att bara beräkna och påvisa redan kända tryckslagsproblem, också kan lokalisera var i anläggningen det kan finnas andra likartade problem. Beräkningsresultaten indikerar också var i anläggningen det kan vara lämpligt att sätta in ytterligare mätinsatser. Effekten av planerade åtgärder såsom luftklockor, långsamtstängande ventiler m.m. kan sedan i en ytterligare beräkningsomgång simuleras så att en optimering av åtgärderna kan ske.

SUMMARY

Undesired pressure variations occur in more or less every water and sewerage distribution system. In sewerage systems this problem has always been obvious, where it results in the breakdown of construction parts and pipe failures. Lately, more and more focus has been put on the same problems within water distribution systems. The objective with this report is mainly to discuss this matter.

Extreme high pressures, a so called water hammer, may occur from sudden changes in flow caused by, for example, pump starts/stops or fast valve movements. Water hammer pressure can damage the system seriously and in combination with other factors cause pipe failures. Low pressure situations can also occur. Specifically shutdowns of pumps and rapid closures of valves may cause negative waves with pressure below the atmospheric pressure. Such a negative pressure in the pipe may result in intrusion of material and contaminated water from outside.

The ongoing rapid developments within computer science over the last couple of years, have ensured that computer aided methods are now a powerful tool used for solving and proving the presence of extreme pressure variations within water and sewer distribution systems. The following report will describe how computer programs can be used for calculating the phenomena. The report includes the following sections:

❒ Introduction with a description of the causes of water hammer and pressure variations in general. In addition, other matters are brought up such as practical limits for pressure, measurements and methods to prevent water hammer.
❒ Two basic examples are presented and the result discussed.
❒ Two more comprehensive examples involving the water distribution systems in Falun and Finspång. Pressure measurements, carried out, are described and the way in which they were used for verification and calibration of the models. Furthermore, the obtained result is discussed and evaluated. Eventually some proposed measurers are presented.
❒ Finally, the structure of the computer programs, LICWATER Dynamic, is described. LICWATER Dynamic was used for all the presented examples in this report. Some other programs available on the market are also briefly described.

The presented examples in this report clearly show the capability of computer programs to, not only calculate and prove the presence of known pressure variations, but also indicate where else within the system variations are likely to occur. Furthermore, the calculated results can be used to identify areas where pressure measurements should be undertaken. The verified model can then be used to simulate proposed measures, such as slowly closing valves, air chambers etc. to prevent water hammer. An optimal solution can eventually be obtained for the system.

FÖRORD

Följande rapport beskriver det relativt vanliga problemet med stora tryckvariationer i VA-anläggningar. Rapporten är till stor del fokuserad på hur man med hjälp av datorprogram kan påvisa och beräkna variationerna i framförallt vattenledningsnät. Fyra exempel beskrivs ganska ingående. Tanken är att dessa exempel skall kunna bidraga till en ökad förståelse för de negativa konsekvenser som för stora tryckvariationer kan få. De presenterade exemplen beskriver också direkt arbetsgången då ett datorprogram används för beräkningarna.

Förutom beräkningar beskrivs också hur och var tryckmätningar kan göras i en anläggning för att erhålla ett nödvändigt komplement till beräkningarna. Kombinationen beräkningar och mätningar visar sig vara mycket värdefull då man vill utreda specifika problem i sin anläggning.

Projektet som i sin helhet har finansierats av VA-FORSK har genomförts av undertecknad. Lennart Andersson, VBB Viak har varit projektledare och dragit upp riktlinjer för studien. Granskning av rapporten har genomförts av Bernt Persson, Göteborgs VA-Verk.

Jag vill tacka Faluns och Finspångs kommun för deras medverkan i projektet. Jag vill också rikta ett stort tack till Bernt Persson, Göteborgs VA-Verk, för värdefulla synpunkter på rapporten.

Stockholm, september 1997

Johan Spännare
VBB Viak AB

INNEHÅLL **Sida**

1	INLEDNING	
1.1	Bakgrund och syfte	1
2.	TRYCKVARIATIONER OCH TRYCKSLAG	
2.1	Tryckvariationer i vattenledningsnät	3
2.2	Uppkomst av dynamiska tryckvariationer	4
2.3	Gränsvärden för tryck	5
2.4	Faktorer som påverkar tryckvariationernas storlek	6
2.5	Vanliga pumprutiner vid vattenverk och pumpstationer	7
2.6	Skyddsanordningar	7
2.7	Tryckmätningar	8
2.8	Förutsättningar för datorsimuleringar av dynamiska tryckförlopp i hela vattenledningsnät med LICWATER Dynamisk	10
3.	EXEMPEL 1 - ENKEL TRYCKLEDNING	
3.1	Systembeskrivning	11
3.2	Beräkning av tryckslag vid pumpstopp	11
3.3	Diskussion	14
4.	EXEMPEL 2 - ENKEL TRYCKLEDNING MED LUFTKLOCKA	
4.1	Systembeskrivning	15
4.2	Beräkning av tryckslag vid pumpstopp	15
4.3	Diskussion	16
5.	EXEMPEL 5 - FALUN VATTENLEDNINGSNÄT	
5.1	Beskrivning av distributionsanläggningen	18
5.2	Problembeskrivning	18
5.3	Pumprutiner vid vattenverket	19
5.4	Tryckmätningar	19
5.5	Beräkning av tryckslag med långsamtstängande ventil efter pumpen	23
5.6	Resultatdiskussion - jämförelser mätningar/beräkningar	25
5.7	Undertryck i ledningar	30
5.8	Diskussion och åtgärder	31
6.	EXEMPEL 6 - FINSPÅNG VATTENLEDNINGSNÄT	
6.1	Beskrivning och kort historik	33
6.2	Pumpdrift och trycksituation vid vattenverket och i ledningsnätet	34
6.3	Införande av varvtalsreglerad pumpning	35
6.4	Resultat av den förändrade pumpdriften	36

6.5	Beräkning av tryckslag vid pumpstopp med långsamtstängande ventil efter pumpen	36
6.6	Resultatdiskussion	37
6.7	Åtgärder	37
7.	BERÄKNINGSPROGRAM	
7.1	Matematiska beräkningsmetoder	39
7.2	LICWATER	39
7.3	PICCOLO	41
7.4	Övriga datorprogram	41
8.	LITTERATUR	
8.1	Referenser	43

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund och syfte

Mer eller mindre hastiga flödesändringar i t.ex. en vattenledning orsakar tryckvariationer. Vid mycket hastiga förlopp kan stora tryck, s.k. tryckslag uppkomma. Dessa höga tryck kan skada ledningen och t.ex. orsaka rörbrott. Tryckvågorna breder ut sig i ledningen och efter en positiv våg följer en negativ våg där mycket låga tryck kan förekomma. Vid undertryck relativt atmosfärstrycket kan fogar skadas och inträngning av partiklar och förorenat vatten utifrån kan i värsta fall ske i ledningen. Vid lägsta möjliga tryck, vacuum, inträffar kavitation vilket är ett instabilt tillstånd och som kan resultera i efterföljande mycket höga tryck som skadar anläggningen.

Tryckvariationer förekommer alltid i VA-anläggningar. På bästa möjliga sätt har man försökt skydda anläggningar och ledningar från effekten. Diskussionerna under den senaste tioårsperioden har dock i huvudsak handlat om tryckavloppsledningar. Där har problemen varit uppenbara. I de anläggningar som inte varit utrustade med skyddsanordningar har helt enkelt rör och vissa konstruktionsdetaljer gått sönder.

Under de senaste åren har mer arbete lagts ner för att dessutom uppmärksamma tryckvariationer i vattenledningsnät. Den mycket vanliga pumprutinen med pumpning med start och stopp mot nivå i en högreservoar medför i många fall stora tryckvariationer då pumpen startar respektive stoppar. På senare år har man för att reducera tryckvariationerna börjat använda varvtalsreglerade pumpar i allt större utsträckning. Detta har också i många fall visat sig reducera antalet läckor betydligt då den dynamiska belastningen på vattenledningsnätet minskar.

När man projekterar pumpanläggningar för vatten- och avloppsledningar bör det ingå som en naturlig del att beräkna effekten av tryckslag. Ofta blir man tvungen att bygga skyddsanordningar som dämpar tryckslagen.

Idag används ett antal datorprogram som kan beräkna dynamiska tryckvariationer i enskilda ledningar såväl som i hela vattenledningsnät. Följande rapport avser bl.a. att illustrera hur man idag kan använda sådana datorprogram för att simulera dynamiska tryckvariationer i hela vattenledningsnät. Syftet är också att belysa vilka mätningar och beräkningar som erfordras samt exempel på åtgärder som är lämpliga för att undvika för stora tryckvariationer i anläggningen.

I ett inledande avsnitt redovisas grundläggande begrepp samt teori vad gäller tryckvariationer. Matematiska samband och formler redovisas inte. För en matematisk bakgrund hänvisas istället till t.ex. VAV, P58, Tryckslag i VA-anläggningar, 1988 samt annan litteratur i ämnet.

Därefter följer avsnitt där vanliga pumprutiner, skyddsanordningar mot tryckslag samt förutsättningar för datorsimuleringar beskrivs kortfattat.

Efter dessa inledande avsnitt följer fyra exempel varav de två första är enkla fall med en pump och efterföljande tryckledning. I det andra exemplet belyses dessutom hur tryckvariationerna kan reduceras tack vare en skyddsanordning efter pumpen.

Exempel nr 3 behandlar Falun vattenledningsnät där tryckslagsberäkningar har genomförts av VBB Viak, år 1994. Mätningar och beräkningar ute på vattenledningsnätet visade att det uppstod undertryck relativt atmosfärstrycket i ledningarna. Detta kan som senare skall diskuteras orsaka inträngning av substans utifrån om otäta fogar finns på ledningen.

Det fjärde exemplet tar upp Finspång vattenledningsnät. Efter att ha bytt pumprutiner från start- och stoppdrift till varvtalsreglerad pumpning har man lyckats reducera antal läckor väsentligt och därigenom reducerat kostnaderna betydligt.

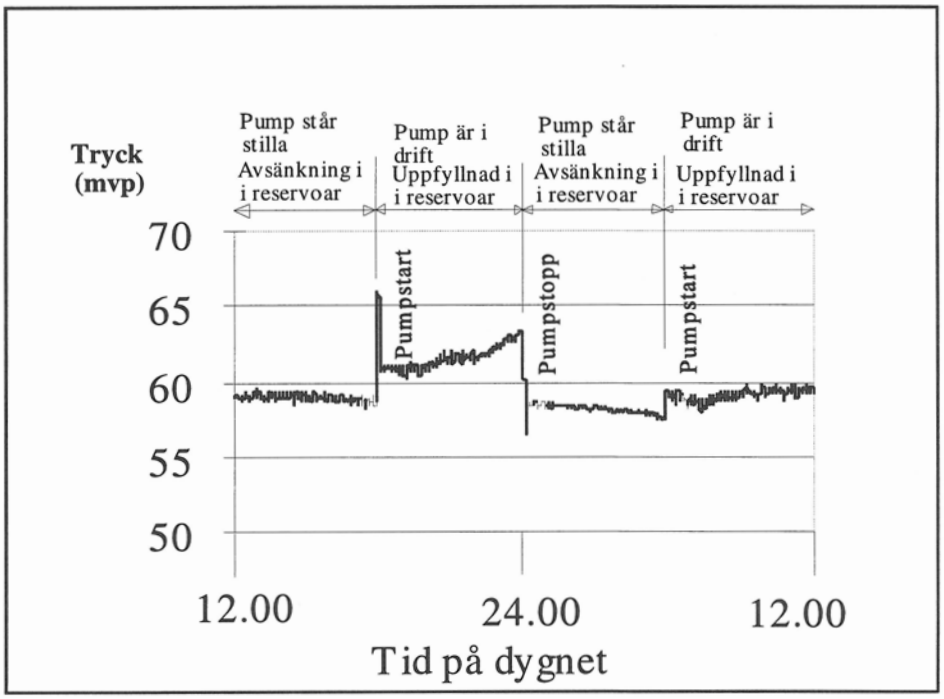
I ett avslutande avsnitt belyses kort några av de olika datorprogram som finns ute på marknaden idag och som kan användas för dynamiska beräkningar av dynamiska tryckvariationer i hela vattenledningsnät.

2. TRYCKVARIATIONER OCH TRYCKSLAG

2.1 Tryckvariationer i vattenledningsnät

STATISKA

En flödesändring i en vattenanläggning skapar en tryckvariation i systemet. Tryckvariationerna kan vara olika snabba och dröja sig kvar i systemet olika länge beroende på vad de orsakas av. I *figur 2.1* ser vi ett exempel på en tryckmätning hämtad från driftövervakningssystemet i Storvreta utanför Uppsala och som visar tryckvariationer i en punkt utanför ett av de två vattenverken. Förutom vattenverken finns en högreservoar.



Figur 2.1 Tryckmätning utanför ett av vattenverken

Tryckvariationer uppkommer av olika anledningar och ofta av någon slags förändring av driftsituationen. I bilden kan man se hur tryckförändringar uppkommer i systemet i samband med pumpstart och pumpstopp. Trycket ökar och minskar till synes mycket hastigt.

Även under tiden mellan start och stopp samt då pumparna står helt stilla varierar trycket om än ganska långsamt. Då pumpen är i drift fylls högreservoaren upp varför uppfordringshöjden ökar. Under pumpstopp sker däremot en avsänkning i reservoaren varför trycknivån i systemet minskar långsamt med tiden.

Den rådande trycksituationen mellan t.ex. start och stopp av en pump som presenteras i *figur 2.1* kan sägas vara statisk. Den är stabil och varierar endast långsamt. Stationära förhållanden kan sägas råda i stort, dvs flödet varierar inte mycket med tiden. Den presenterade tryckmätningen gäller för ett helt dygn och har därför inte särskilt hög tidsupplösning.

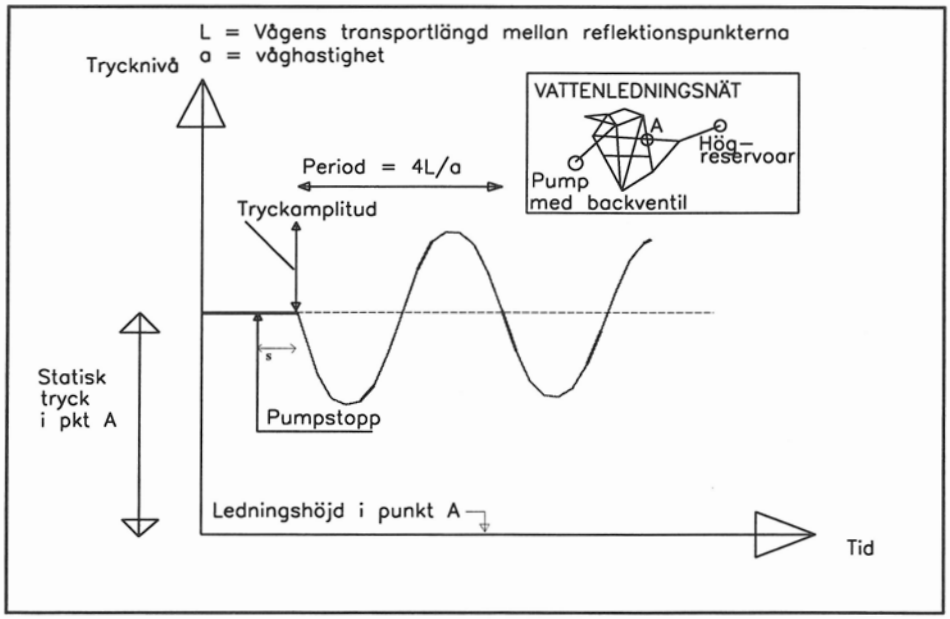
DYNAMISKA TRYCKVARIATIONER

I dynamiska förlopp varierar flödet med tiden, dvs icke stationära förhållanden råder. Dessa varar normalt i en begränsad tid och övergår så småningom i relativt stationära förhållanden. Som syns i tryckmätningen i *figur 2.1* sker en hastig tryckhöjning efter den första pumpstarten. Trycket höjs till synes momentant till ca 66 mvp för att sedan återgå till det statiska trycket, uppfordringshöjden för pumpen. Likadant gäller för ett pumpstopp. Då uppträder istället låga tryck momentant vilket även det illustreras i bilden. Dessa snabba tryckvariationer är dynamiska och dess förlopp och varaktighet beror av ett antal faktorer som diskuteras i avsnitt 2.4.

Tryckmätningen i *figur 2.1* har en noggrannhet på en (1) registrering per minut vilket inte är tillräckligt för att påvisa de allra högsta eller lägsta förekommande trycken i ledningen. Vi ska i Falun-exemplet i avsnitt 5.4, se att det för deras nätverk åtminstone behövs en upplösning på ca 3 sekunder mellan varje registrering för att extremtryck skall uppfattas av tryckloggern.

2.2 Uppkomst av dynamiska tryckvariationer.

Betrakta *figur 2.2* nedan där en godtycklig punkt i ett vattenledningsnät valts ut. Bilden kan sägas illustrera en tryckmätning över vad som händer i punkt A efter t.ex ett pumpstopp med omedelbar stängning av backventil. Låt oss tänka oss att pumpen från en början är i drift och tillsammans med en högreservoar och den rådande vattenförbrukningen bestämmer det statiska trycket i anläggningen.



Figur 2.2 Tryckvågsutveckling i en punkt A på vattenledningsnätet

Efter en tid stannar pumpen och backventilen stänger momentant. Ett lägre tryck relativt det statiska trycket bildas direkt nedströms ventilen.

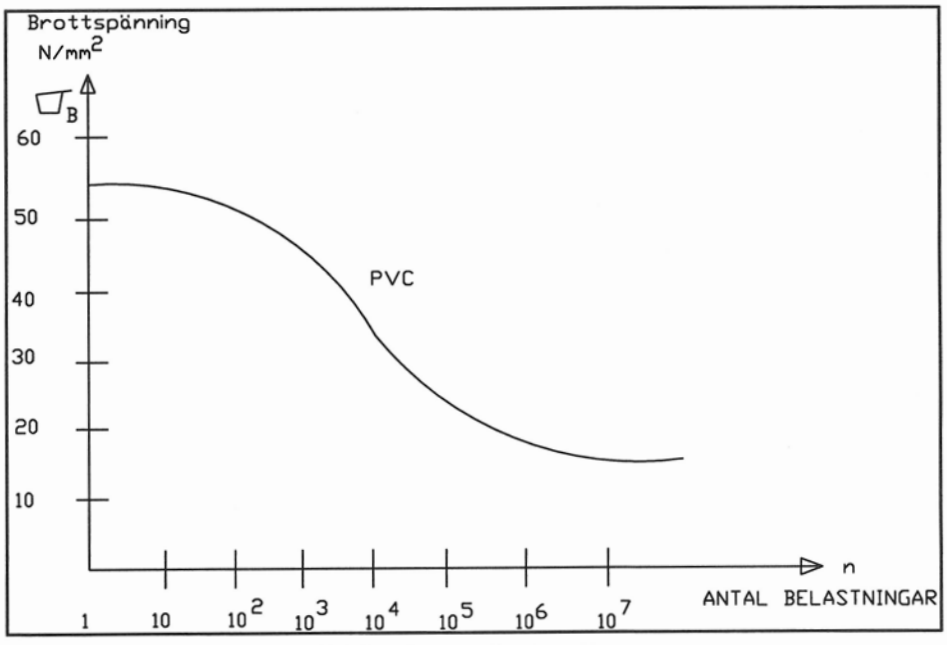
Tryckvågen transporteras i systemet och når punkt A efter en viss tid, s, i bilden. Vågens amplitud beror bl.a. av våghastigheten. Vågfronten kommer att primärt reflekteras vid högreservoaren samt vid backventilen vid pumpen. Skillnaden mellan de två reflektionspunkterna är att vid ventilen kan vågen inte utjämnas eftersom ventilen är stängd. En negativ våg kommer därför att reflekteras till en negativ våg och tvärtom. Vid högreservoaren däremot, kan trycket utjämnas eftersom flöde kan ske in och ut från reservoaren. En negativ våg reflekteras därför till en positiv här. Stängda ventiler och öppna tappställen kommer också att fungera som sekundära reflektionspunkter och påverka utbredningsförloppet.

2.3 Gränsvärden för tryck

Vi har i föregående avsnitt diskuterat hur tryckvariationer uppkommer och att både mycket höga och låga tryck kan uppkomma i ledningsnät. Nedan följer några praktiska gränsvärden vad gäller tryck i ledningsnät. Tryckangivelserna kommer i fortsättningen att nämnas i meter vattenpelare relativt atmosfärstrycket. 10 mvp = ca 100 kPa.

70-80 mvp Högre tryck än dessa värden skall helst inte förekomma i distributionsanläggningen. Ofta finns säkerhetsventiler på ledningen som utlöses i fall trycket överstiger dessa värden.

Brotthållfastheten varierar naturligtvis för olika material men ska vara tillräckligt hög för att klara ett extremt tillstånd. Då en ledning utsätts för ett mycket stort antal lastväxlingar under lång tid kommer dock materialet att utmattas och brotthållfastheten minskar drastiskt. Detta belyses i diagrammet i figur 2.3 nedan som visar ett exempel på en s.k. Wöhler kurva. Diagrammet är taget ur VAV's publikation P58.



Figur 2.3 Exempel på Wöhler-kurva för PVC-rör

En pumpdrift på start och stopp där start inträffar låt oss säga några ggr per dag, innebär tusentals lastväxlingar per år. Antag vidare att dessa lastväxlingar leder till tryckvariationer med stor amplitud. Det betyder enligt diagrammet i *figur 2.3* att redan efter ca 10-20 år har brotthållfastheten halverats för en PVC-ledning i vattenledningsnätet. Detta kan till slut leda till brott på ledningen.

20 mvp Praktiskt minimitryck för att vatten skall kunna erhållas ur kranen hos abonnenten. Sådana låga statiska tryck förekommer främst i högt belägna områden. Lokala tryckstegringar skapas ofta för att undvika för låga tryck.

< 0 mvp Vid negativa tryckvågor i ledningar kan det hända att trycket momentant understiger atmosfärstrycket vilket kan leda till att förorenat vatten och löst material sugs in utifrån.

- 8 mvp Undertryck relativt atmosfärstrycket i ledningar kan som vi skall se uppträda i ledningar. Om trycket understiger -8 mvp sker i regel s.k. kavitation vilket är ett instabilt tillstånd. Vid ett sådant lågt tryck kokar nämligen vatten vid temperaturer mellan 0 -25 C. Tillståndet kan resultera i mycket stora tryckslag.

2.4 Faktorer som påverkar tryckvariationernas storlek

Tryckvariationsförloppen varierar i utseende beroende på anläggningens/konstruktionens utformning och kondition. Här belyses kort några faktorer som även tas upp i de efterföljande exemplen och som påverkar tryckförloppet. För en mer ingående beskrivning hänvisas till annan litteratur i ämnet.

Våghastigheten

Våghastigheten i ledningen har stor betydelse för hur kraftig vågen blir, dvs storleken av vågamplituden. Våghastigheten beror i sin tur bl.a. av ledningens elasticitetsmodul samt dessutom av dess innerdiameter och godstjocklek. Som exempel kan nämnas att PVC som har en förhållandevis låg elasticitetsmodul, medför våghastigheter på ca 100 - 400 m/s beroende på diameter och godstjocklek. Betong däremot, och framförallt gjutjärn och segjärn medför väsentligt högre hastigheter, ända upp till 1300 m/s eller mer. I Exempel 1 har våghastighetens betydelse för tryckförloppet åskådliggjorts.

Andra yttre faktorer som kan påverka våghastigheten är tryck, temperatur samt vattnets innehåll av löst luft. Temperaturens och tryckets inverkan är ganska ringa medan luftinnehållet har stor betydelse. Ett stort innehåll av olösta gaser minskar våghastigheten drastiskt. Se VA-FORSK rapport nr 1993-02 och VAV, P58.

Massströghetsmoment hos pump

En pumps massströghetsmoment kan vara avgörande för hur pumphjulet retarderar då pumpen stängs av. Ett stort massströghetsmoment dämpar tryckamplituden hos tryckvågorna.

Ventilmanövreringstid

Ofta finns förutom en backventil, en långsamtstängande ventil efter pumpen. Ventilstängningstiden är av stor betydelse för tryckvågens utseende. Ju längre denna är desto mer dämpat blir tryckutbredningsförloppet. Se vidare avsnitt 2.6.

2.5 Vanliga pumprutiner vid vattenverk och pumpstationer

Pumprutiner vid vattenverket i en distributionsanläggning har stor betydelse för huruvida och i vilken omfattning tryckvariationer förekommer. Den vanligaste pumpdriften vid ett vattenverk har traditionellt varit start och stopp-drift mot nivå i t.ex. en högreservoar.

På senare år har emellertid pumpdriften i många kommuner ersatts till att bli varvtalsreglerad. Detta utesluter dock inte att man förutom den varvtalsreglerade pumpen t.ex. har en eller två pumpar som används vid behov vid t.ex. förbrukningstoppar. Det medför därför att plötsliga start och stopp sker då och då. I många fall sker sådan kompletteringspumpning under tider då energipriset är som lägst, vanligtvis nattetid mellan säg kl 22-06. Oftast fylls då reservoaren upp under denna tid för att kunna utnyttjas under högförbrukningstimmar dagtid.

Vanliga pumptyper är centrifugalpumpar utformade med någon form av backventil direkt efter pumpen för att hindra ett reversibelt flöde genom densamma. I regel finns dessutom någon form av skyddsanordning mot tryckslag. Detta kan i många fall vara en långsamtstängande ventil efter pumpen.

2.6 Skyddsanordningar

Oavsett vilken pumpdrift som råder i den aktuella anläggningen är det i de flesta fall nödvändigt att komplettera anläggningen med någon form av skyddsutrustning mot tryckslag. Detta också med tanke på risken för strömavbrott som kan inträffa i alla anläggningar. Ett skydd kommer att löna sig i längden inte minst kostnadsmässigt då tryckslag allvarligt kan skada anläggningens delar. Ett ledningsbrott i en känslig del av vattenledningsnätet får ju dessutom direkta konsekvenser som t.ex utebliven vattenleverans, stora vattenförluster, vattenskador och tryckfall i vattenledningsnätet. I det följande redovisas några olika anordningar som skyddar mot tryckslag och som kan placeras i t.ex vattenverket nära pumparna.

Långsamtstängande ventil

En bra åtgärd som kan vidtagas direkt efter pumpen är att installera en långsamtstängande ventil som dämpar tryckvariationerna vid hastiga flödesändringar. En sådan ventil saktar ner hela flödes-reduceringsförloppet genom pumpen. Ventilstängningsförloppet skall idealt ge ett linjärt flödesminskningsförlopp i tiden och pågå i tillräckligt lång tid. Detta är dock svårt att åstadkomma i praktiken. Ventilstängningstiden måste väljas omsorgsfullt utifrån anläggningens egenskaper. I Exempel 3, Falun vattennät, användes en ventilstängningstid på 45 sekunder. Pumpstopp bör ske i det ögonblick som ventilen stängs helt.

Flödesminskningen genom en ventil beskriver alltså i praktiken inte ett linjärt förlopp utan är som kraftigast under de sista 20-30 % av ventilstängningsfasen. Detta demonstreras också i Exempel 3, Falun vattenledningsnät. Det är alltså av vikt att om möjligt minska ventilstängningshastigheten under denna sista fas av stängningsförloppet. Olika ventiler har olika karakteristik vilket innebär att samma stängningförlopp inte ger samma flödesminskningsfunktion. En ventils karakteristik kan sägas beskrivas av en tryckförlustfaktor. Tryckförlustfaktorn beskriver i princip hur stort tryckfallet blir över ventilen vid en speciell öppningsgrad.

En nackdel med ventilen är att dess funktion sätts ur spel vid strömavbrott i anläggningen.

Luftklocka

En luftklocka är vanlig i många anläggningar och är ett effektivt skydd mot tryckslag. Klockan har fördelen att fungera även vid strömavbrott i anläggningen. Klockan är en tillsluten behållare som innehåller en viss mängd luft som står under tryck. I Exempel 2 skall vi se hur tryckvariationerna kan dämpas väsentligt då en tryckklocka installeras efter pumpen. I exemplet redogörs dessutom mer ingående för dess funktion.

Svalltorn

Detta fungerar i princip som en luftklocka men är helt öppen för atmosfärstrycket.

Andra skyddsanordningar finns och beskrivs ingående i VAV, P58, 1988.

2.7 Tryckmätningar

För att påvisa tryckvariationer i distributionsanläggningen måste i princip tryckmätningar genomföras dels vid själva anläggningarna (vattenverk, tryckstegringsstationer m.m.) men också ute i vattenledningsnätet. Tryckmätningar kan också betraktas som en del av arbetet att verifiera en datormodell över anläggningen. Här kommer kort att beskrivas var och hur tryckmätningar kan genomföras i distributionsanläggningen.

Placering

Tryckmätare bör placeras på strategiska platser i anläggningen, noga genomtänkta från början. Generellt kan följande råd ges:

❒ Vid vattenverk bör mätare placeras på utgående ledning.
❒ Vid tryckstegringsstation i vattenledningsnätet bör tryckmätning ske på båda sidor om stationen. Då förändring av flödet sker genom stationen kommer nämligen tryckvariationer ske på båda sidor om denna.
❒ I vattenledningsnätet bör mätare placeras i högt och lågt belägna områden där man vet att låga respektive höga statiska tryck förekommer normalt. Sådana områden kan ju identifieras direkt på höjdkarta eller med hjälp av en hydraulisk datorberäkning. En sådan indikerar i vilka områden extrema (låga och höga) statiska tryck förekommer, orsakade av t.ex. otillräckliga ledningsdimensioner i området. Vidare bör naturligtvis mätare placeras där man sedan tidigare vet att problem förekommer t.ex. klagomål på dåligt tryck (inget vatten i kranen) hos konsument, platser där rörbrott inträffat eller säkerhetsventiler som löser ut utan någon till synes orsak.

Upplösning på mätning

Då statiska tryck uppmätes i vattenledningsnätet behövs ingen hög tidsupplösning på mätningen. Däremot, om syftet är att fånga de dynamiska tryckvariationerna krävs betydligt högre tidsupplösning. Hur hög beror bl.a. på storleken på distributionsanläggningen. I ett relativt stort vattenledningsnät som i Falun användes tidsupplösningen en (1) registrering var 3:e sekund. Mätningen gav ett mycket gott resultat och redovisas i Exempel 3 i rapporten.

Det finns idag mätare som klarar av åtskilliga registreringar per sekund. Detta innebär naturligtvis att man har möjlighet att fånga upp även de mest extrema tryckvärdena samt även tryckvågor som reflekteras i sekundära punkter ute på nätet. Valet av mätupplösning måste alltså väljas från fall till fall och utgå från själva syftet med mätningen och vad man önskar för resultat av den.

Mätprogram

Ofta vill man påvisa effekten av en förändring i driftanläggningen. Det kan t.ex. vara start eller stopp av pumpar eller stängning och öppning av ventiler. Det är då lämpligt att utarbeta ett mätprogram för händelsen i fråga. Detta kan alltså vara att stoppa och starta pumpar medvetet vid vissa tidpunkter under dygnet samtidigt som tryckmätare finns utplacerade på platser som bestämts. Ett sådant mätprogram har utarbetats för Falun och beskrivs ingående i Exempel 3 i denna rapport.

Mätutrustning

Det finns en rad olika typer av mätare ute på marknaden i dagsläget. Det är viktigt att välja mätutrustning som är bäst anpassat för ändamålet för

mätningen, dvs ofta hur hög upplösning som krävs för mätningen. Många av dagens mätare är direkt kopplade till någon form av programvara så att man på ett mer eller mindre enkelt sätt kan åskådliggöra resultaten direkt på en datorskärm. Att ha i åtanke om man önskar en mycket hög upplösning på mätningen, säg flera registreringar per sekund, är att mängden data som erhålls kan bli enorm och sätter en begränsning på hur länge man kan ha mätaren på plats ute.

2.8 Förutsättningar för datorsimuleringar av dynamiska tryckförlopp i hela vattenledningsnät med LICWATER Dynamisk

De medtagna exemplen i denna samling har beräknats med LICWATER Dynamisk som är en dynamisk modul till huvudprogrammet LICWATER. Programvaran är utvecklad av LICconsult A/S i Danmark. I det följande beskrivs kortfattat de olika stegen och förutsättningarna för hur en tryckslagsberäkning sker i LICWATER Dynamisk.

Antag att vi har en modell över ett vattenledningsnät med ett vattenverk och en reservoar. Modellen innehåller samtliga indata inklusive fullständig geometri, vattenförbrukning, pumpkurvor samt randvillkor som kan vara fasta tryck- eller flödesangivelser i en eller flera punkter.

LICWATER används för att simulera den hydrauliska situationen vid en bestämd tidpunkt. Detta resulterar i en resultatfil för tidpunkten i fråga där samtliga tryck och flöden finns beräknade för modellens alla beståndsdelar. Beräkningen genomförs med en numerisk metod. Inom ett bestämt antal iterationer skall en matematisk lösning vad gäller tryck och flöden ha uppnåtts som kan accepteras inom bestämda felmarginaler. Vidare är beräkningen rent stationär, dvs flödet betraktas som konstant med tiden.

Resultatfilen används sedan som indata till en dynamisk beräkning. Man beskriver dessutom den händelse som primärt skall simuleras, t.ex. start eller stopp av pumpar. Separat beskrivs dessutom ingående komponenters karakteristik såsom pumpkurvor, massströghetsmoment, elasticitetsmoduler, ventilkarakteristik mm.

Den dynamiska beräkningen startar alltså från de uppnådda resultaten från den stationära beräkningen av LICWATER. Skillnaden nu är att den fortsatta beräkningen är icke stationär, dvs flödet ändras med tiden. Dessutom tillämpas elastisk teori, varför hänsyn tas till elasticiteten hos både rörväggar och vatten . Detta är nödvändigt för att räkna på de mycket snabba tidsförlopp som tryckslag är. Även den dynamiska beräkningen genomförs numeriskt.

Resultaten åskådliggörs sedan i form av resultattabeller och tidsserier/profilplottar över tryck och flöden i ledningar och punkter. Dessutom kan s.k. slide shows visas, där rörliga bilder över t.ex. en tryckvågs utbredning åskådliggörs direkt på dataskärmen. I avsnitt 7.2 redogörs för programstrukturen i LICWATER Dynamisk.

3. EXEMPEL 1 - ENKEL TRYCKLEDNING

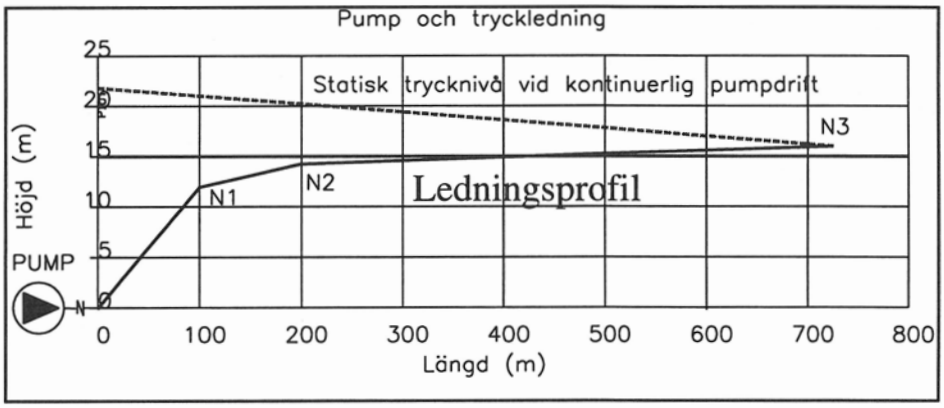
3.1 Systembeskrivning

Det första exemplet belyser hur trycket varierar i en tryckledning efter det att en pump i dess ände stannar. Exemplet bygger på exempel 2, bilaga 1 i VAV, P58, Tryckslag i VA-anläggningar, 1988. Exemplet behandlar en avloppspumpstation där vattnet regelbundet pumpas upp till en viss nivå för att därifrån fortsätta med självfall.

Följande data gäller för exemplet :

Total ledningslängd = 725 m
Ledningsdiameter = 0.151 m
Rörmaterial = PVC
Friktionsförlust vid 16 l/s = 6 m
Driftpunkt - pump = 16 l/s: 22 m
Verkningsgrad = 0.5
Varvtal : 1450 varv/minut
Masströghetsmoment motor och pump = 0.15 kg m²
Våghastighet = 300 m/s

I *figur 3.1* illustreras anläggningen med ledningens läge i höjdled och trycknivåer vid stationär drift. Vi ser att pumpen höjer trycket med 22 meter vilket inklusive friktionsförlusten på sträckan alltså motsvarar trycknivån i punkt N3.



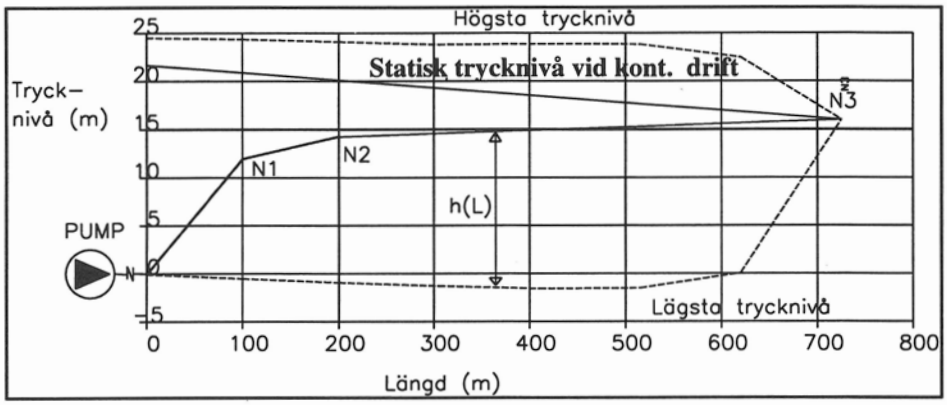
Figur 3.1 Exempel 1, Enkel tryckledning

Vattnet pumpas alltså från nivån 0 m upp till punkt N1 på nivån 12 m, vidare upp till punkt N2 på nivå 14 m och slutligen upp till punkt N3 på nivån 16 m där vattnet sedan fortsätter med självfall.

3.2 Beräkning av tryckslag vid pumpstopp

Vi skall i det följande diskutera vad som händer vid ett pumpstopp med en efterföljande momentan stängning av backventil direkt efter pumpen. Händelsen har simulerats med LICWATER Dynamisk och resultatet illustreras i *figur 3.2*. Här presenteras en trycknivåprofil där även

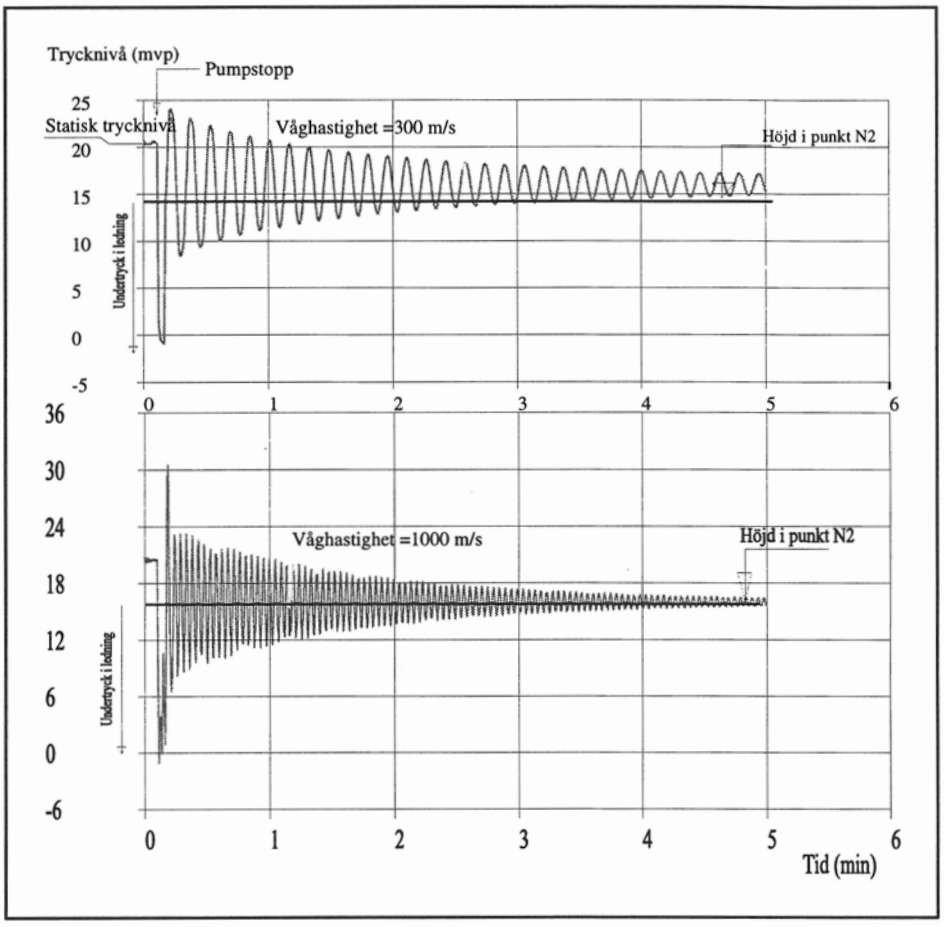
ledningens läge i plan har illustrerats. De största och minsta trycknivåerna utefter ledningen finns utmärkta. Det största undertrycket inträffar som man kan se på sträckan N2 till N3. Dess tryckamplitud h(L) vilket också betecknar trycket i ledningen är då ca 0-16 = - 16 meter. Kavitation kan inträffa redan vid 8 meter undertryck varför ett pumpstopp i detta fall skulle kunna vara förödande för anläggningen.



Figur 3.2

Det krävs alltså någon form av skyddsutrustning mot tryckslag för att dämpa vågorna till acceptabla nivåer för anläggningen. I nästa exempel behandlas samma anläggning fast med en luftklocka monterad direkt efter pumpen.

Rörmaterialet har som tidigare nämnts stor betydelse för våghastigheten. Våghastigheten beror nämligen bl.a. på rörmaterialets elasticitetsmodul. Se avsnitt 2.4. I exemplet har effekten studerats med PVC-rör. Våghastigheten är för PVC ca 300 m/s. För att illustrera hur att annat material påverkar tryckvågen i ledningen har även en beräkning gjorts för segjärnsledningar. Ett sådant material har en våghastighet på ca 1000 m/s. I *figur 3.3* redovisas tryckvågens förlopp i punkten N2, 200 meter från pumpen.



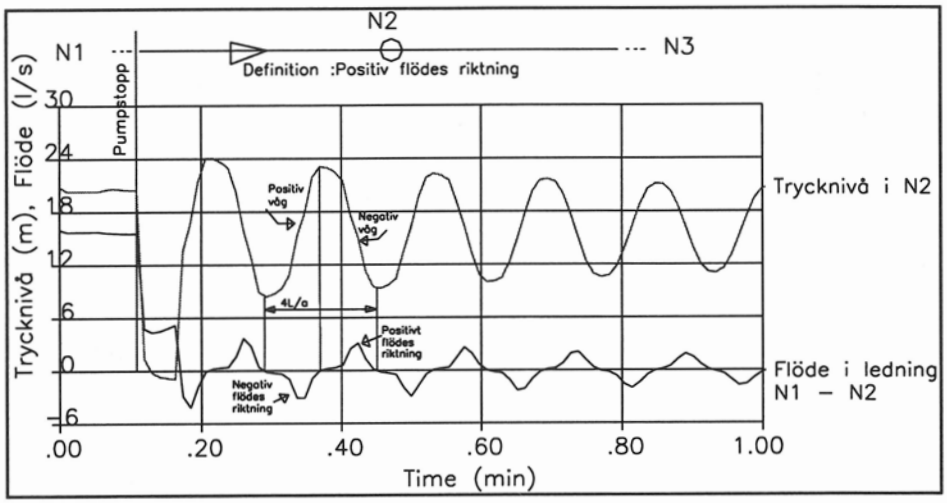
Figur 3.3 Jämförelse av tryckvågens utveckling vid pumpstopp i punkt N2 för olika våghastigheter

Den största skillnaden i resultat med ett sådant material är naturligtvis att vågorna får ett mycket snabbare förlopp än tidigare. Amplituden ökar också betydligt med en högre våghastighet. Detta gäller framförallt den första vågfronten. Därefter sker ett dämpningsförlopp liknande det som skedde med PVC-rör.

Figur 3.4 har tagits fram för att belysa hur vågfronterna rör sig i förhållande till flödesvariationen i den aktuella ledningen. Tryckvågorna uppkommer ju på grund av flödesvariationer. Se avsnitt 2.2.

Vi kan i bilden se hur flödet och därmed trycket sjunker omgående efter pumpstopp och hur negativ flödesriktning motsvarar en positiv flödesvåg och tvärtom. Ett positivt flöde enligt figurens definition medför ju att flödet tar kurs bort mot punkt N3 där en öppning finns och alltså möjlighet för trycket att utjämnas. Detta positiva flöde orsakar därför en volymminskning och därmed en tryckminskning i den studerade ledningen. Ett negativt flöde enligt definitionen indikerar att ett flöde sker mot den stängda backventilen där ingen utjämning kan ske. Resultatet av denna negativa flödesriktning blir alltså att vattnet komprimeras i ledningen, dvs trycket ökar.

Perioden för en hel våg kan uttryckas som 4 x längden delat med våghastigheten (4L/a). Med längden 725 meter och våghastigheten 300 m/s erhålls en vågperiod på ca 10 sekunder (0.16 minuter). Detta illustreras i *figur 3.4.*



Figur 3.4 Tryck/flödes diagram i en ledning efter ett pumpstopp

3.3 Diskussion

Exempel 1 visar tydligt att ett plötsligt pumpstopp medför märkbara belastningar på anläggningen om inga skyddsåtgärder har vidtagits i systemet. I beräkningen har inte kavitationsmöjligheten simulerats. Vi kan dock se att t.o.m. lägre tryck än -8 mvp relativt atmosfärstrycket inträffar vilket innebär att kavitation kan ske i systemet. Ett sådant tillstånd kan skada ingående konstruktioner allvarligt. På motsvarande sätt som vid ett pumpstopp, kan ett pumptillslag också orsaka efterföljande oönskade stora tryckvariationer. Detta fall har dock inte beräknats här.

Det behövs alltså någon form av åtgärd i anläggningen som förhindrar att extrema tryck inträffar. I Exempel 2 skall vi studera hur tryckvågornas framfart dämpas och försvagas då en luftklocka installeras i samma anläggning som i Exempel 1.

4. EXEMPEL 2 - ENKEL TRYCKLEDNING MED LUFTKLOCKA

4.1 Systembeskrivning

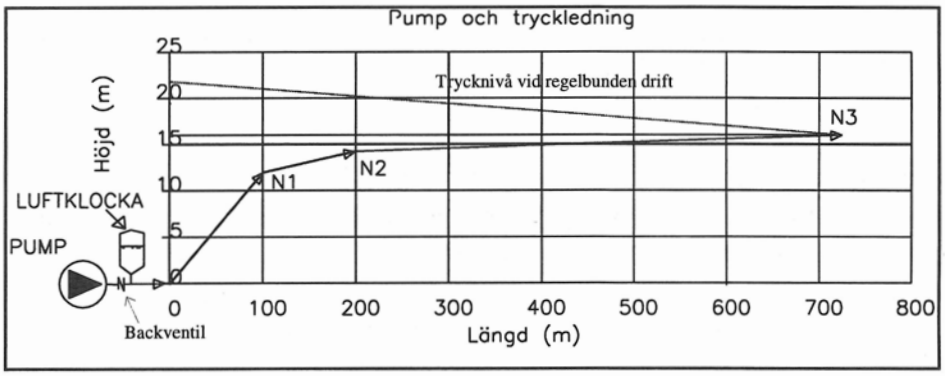
Exempel 2 innehåller samma fysiska data som Exempel 1. En luftklocka har installerats efter pumpen för att dämpa tryckvariationerna.

Luftklockan innehåller en viss volym luft som vid stationär drift står under ett bestämt konstant tryck. Då pumpen stannar och backventilen stänger, sjunker trycket nedströms pumpen och vatten strömmar ut från klockan. Detta kommer att sakta ned flödesförändringen i systemet. Detta kommer i sin tur att dämpa vågutbredningen eftersom tryckvågornas storlek just beror av storleken på flödesförändringen. Då flödet sedan vänder efter reflektion i utloppet kommer istället vatten att strömma in i klockan igen eftersom backventilen är stängd.

Luftklockans storlek skall väljas med omsorg och med hänsyn till den aktuella anläggningen. Stor roll spelar den fria ledningslängden ut från pumpstationen. Ju längre denna är desto större tryck måste utjämnas och därmed större erforderlig volym i klockan. Mer om dimensionering och utformning av tryckklockor redovisas i VAV, P58, 1988.

Samma indata som för anläggningen i Exempel 1 gäller även här.
Följande data gäller för luftklockan som använts i Exempel 2.

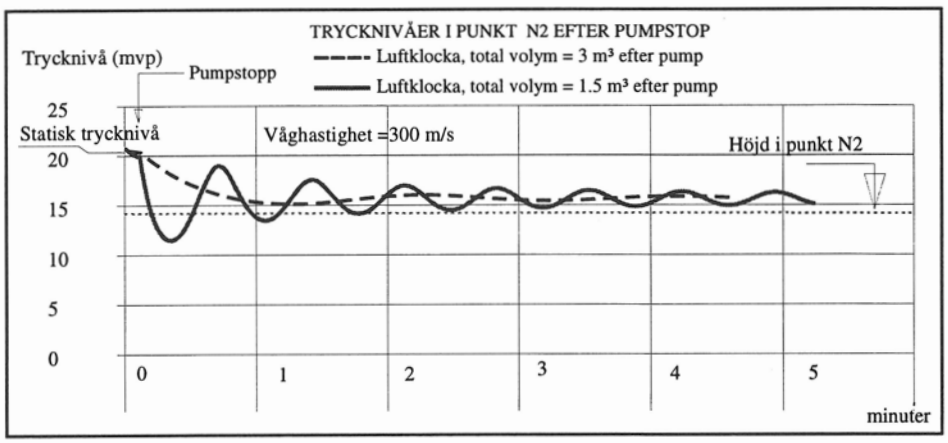
Total volym	= 1.5 m³	Initial luftvolym = 0.40 m³
Bottenarea	= 0.6 m²	



Figur 4.1 Exempel 2, Enkel tryckledning med luftklocka

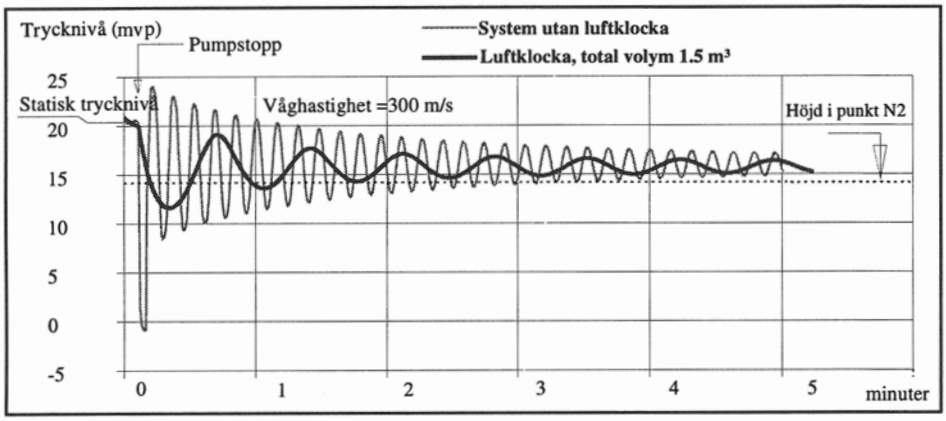
4.2 Beräkning av tryckslag vid pumpstopp

Vi ska även i detta exempel studera ett momentant pumpstopp. Resultat från LICWATER Dynamisk för tryckvågens utveckling under 5 minuter har tagits fram och redovisas i *figur 4.2*. En jämförande beräkning har genomförts för samma system med en dubbelt så stor luftklocka volymmässigt. Även detta resultat har lagts in i *figur 4.2*. Resultatet är tydligt. Den större luftklockan dämpar fullständigt tryckvågen och trycknivån intar nästan omgående sitt jämviktsläge.



Figur 4.2 Tryckvariation i punkt N2 för olika volymer på luftklockan

I *figur 4.3* redovisas resultat från de dynamiska beräkningarna för både Exempel 1, System utan luftklocka och Exempel 2, system med luftklocka med totalvolym 1.5 m³.



Figur 4.3 Tryckutveckling i punkt N2 efter pumpstopp för Exempel 1 och Exempel 2

En uppenbar förbättring kan konstateras då luftklockan installerats. Trycket faller inte mer än ca 10 mvp jämfört med över 20 utan luftklocka. Detta innebär att kavitation kan undvikas i ledningen. Vågutbredningsförloppet är dessutom mycket långsammare med luftklocka än utan. Detta medför färre belastningar per tidsenhet på anläggningen vilket är ett önskvärt mål på sikt.

4.3 Diskussion

Vi har med detta enkla exempel visat hur man med en ganska enkel anordning kan dämpa tryckvariationerna väsentligt. En installation av en luftklocka medför naturligtvis en kostnad men kan i längden visa sig vara en lönsam investering eftersom anläggningens livslängd ökar. En luftklocka är också mycket driftsäker eftersom den momentant står redo att utjämna tryckvariationer under dygnets alla timmar. Detta har stor betydelse vid t.ex. ett strömavbrott i anläggningen.

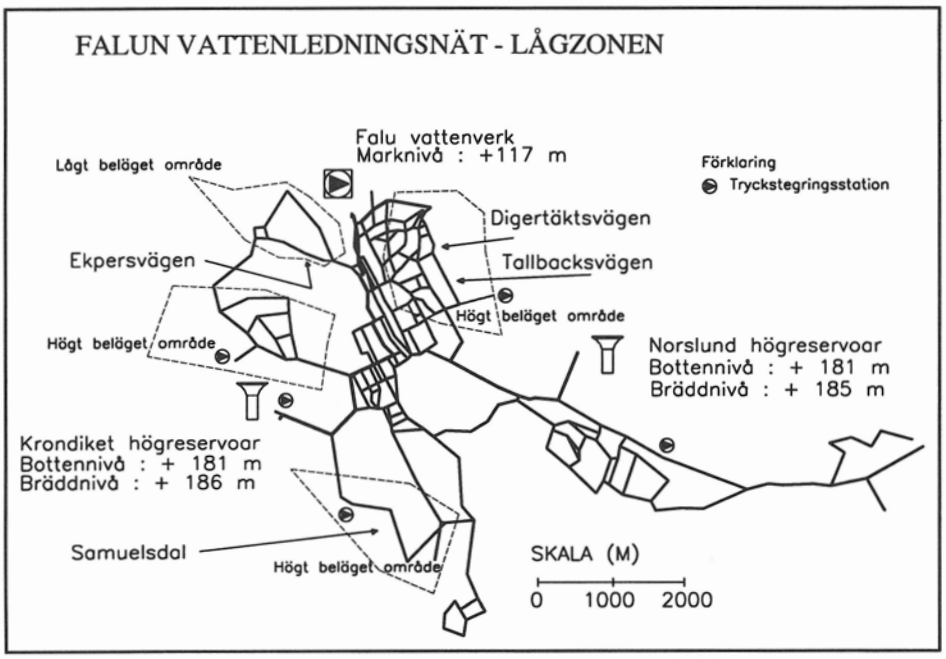
Tryckamplituden minskar alltså betydligt och vågutbredningsförloppet blir långsammare. Hur stor effekten blir beror bl.a. på klockans storlek samt dess luftinnehåll.

Klockans storlek, luftvolym och utformning måste väljas med omsorg för den aktuella anläggningen. Dimensioneringsprinciper finns beskrivna i VAV, P58. Det är också mycket viktigt att tillsyn sker av klockan med jämna mellanrum, speciellt så att dess luftvolym är tillräcklig.

5. EXEMPEL 3 - FALUN VATTENLEDNINGSNÄT

5.1 Beskrivning av distributionsanläggningen

Figur 5.1 visar en planbild över vattenledningsnätet (lågzonen) i Falun. Falu vattenverk är beläget i den norra delen av samhället. Utöver vattenverket finns två högreservoarer. Dessa är Krondiket samt Norslund i stadens västra respektive östra del. Dessutom existerar några lokala högzoner i staden vilka dock ej ingår i den uppbyggda modellen.



Figur 5.1 Falun vattenledningsnät

Vattenledningarna består till största delen av gjutjärn och segjärn men även plastmaterial förekommer.

5.2 Problembeskrivning

Falu tätort är kuperat vilket betyder att trycksituationen är tämligen ojämn i staden. För de högst belägna delarna av staden har högzoner konstruerats men det finns även områden i lågzonen som ligger högt. Nätet är därför känsligt för stora och upprepade tryckvariationer som kan uppkomma i samband med t.ex. till- och frånslag av pumpar. Speciellt negativa vågor skapar problem i högt belägna områden. Dessa finns i de östra och sydvästra delarna av vattenledningsnätet. Låga tryck orsakar som diskuterats i avsnitt 2.3 svårigheter att erhålla vatten ur kranen hos konsumenten. I värsta fall kan undertryck inträffa vilket innebär en risk för inträngning av substans utifrån. I *figur 5.1* visas de områden som är högst belägna.

Liksom låga tryck ställer även höga tryck till besvär ute på ledningsnätet. Att höga tryck förekommer i Falun har konstaterats genom till synes oförklarliga utlösningar av säkerhetsventiler i områden nära Ekpersvägen.

Som tidigare har omtalats i rapporten nedsättes ledningsmaterialets brotthållfasthet då det utsätts för upprepade lastväxlingar med tillräckligt stor amplitud under mycket lång tid. Materialet "utmattas" och brott inträffar förr eller senare på ledningen *(figur 2.2)*. Detta är fallet i Falun där man också mycket riktigt haft bl.a. en stor vattenläcka på en huvudledning. Brottet kan då alltså ha orsakats av tryckslag som en utlösande faktor.

5.3 Pumprutiner vid vattenverket

Här beskrivs driftsituationen som den såg ut år 1994. Vid vattenverket fanns vid tillfället tre pumpar vars start och stopp styrdes mot nivå vid Krondikets högreservoar. Den största pumpen, P1, har en kapacitet på ca 210 l/s medan de två andra, P2 och P3, maximalt pumpar ut 160 l/s resp. 60 l/s. Pumparna kördes i olika kombinationer. Kombinationen P2+P3 ger maximalt ett flöde på 210 l/s. Ett typiskt dygn kunde pumpningen se ut enligt nedanstående schema.

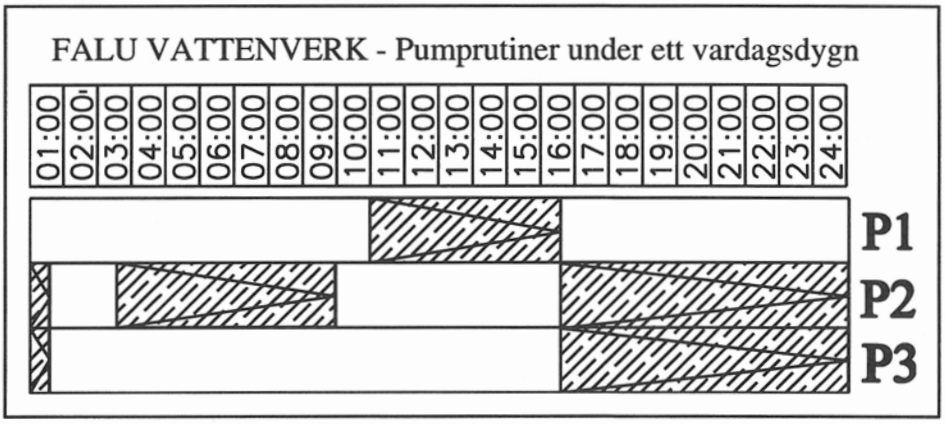


Bild 5.2 Pumprutiner vid Falu vattenverk år 1994

Som vi ser i *figur 5.2* sker alltså pumpstart och pumpstopp flera gånger om dygnet. Då pumparna är i drift lyfts vattnet ca 70 meter vilket motsvarar trycknivån i högreservoaren Krondiket exklusive de tryckförluster som sker i ledningarna. Storleken av dessa är några få meter.

Pumparna är utrustade med backventiler och efterföljande långsamtstängande ventiler. Vid t.ex. ett planerat pumpstopp skall en sådan ventil börja stänga en viss tid före det att pumpen definitivt stannar. I det ögonblick då ventilen helt stänger sker det egentliga pumpfrånslaget. Ventilstängningstiden är ca 45 sekunder. I avsnitt 2.6 diskuterades en sådan ventils skyddande effekt mot tryckslag.

5.4 Tryckmätningar

De existerande pumprutinerna vid vattenverket orsakade på sina håll stora tryckvariationer i ledningsnätet. Bl.a. för att påvisa dessa variationer genomfördes mätningar med relativt hög tidsupplösning (en (1) registrering var 3:e sekund). Se även avsnitt 2.7.

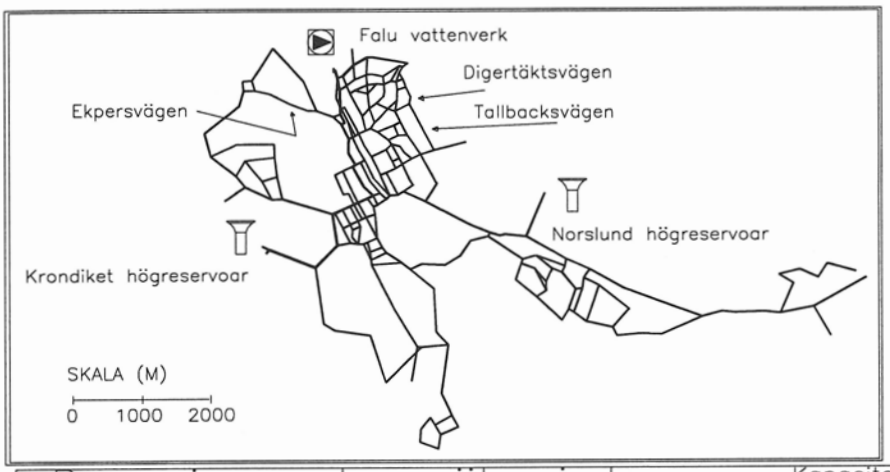
Mätpunkterna har valts inom de områden där man konstaterat problem med låga och höga tryck. Två av mätpunkterna ligger i den högt belägna östra delen av staden (Tallbacksvägen och Digertäktsvägen) och den tredje i den lågt belägna västra delen av staden (Ekpersvägen). Enligt ett förutbestämt program startades och stoppades pumparna vid olika tidpunkter under de tre timmarna som mätningarna pågick. Tryckmätningar i allmänhet har tidigare diskuterats i avsnitt 2.7.

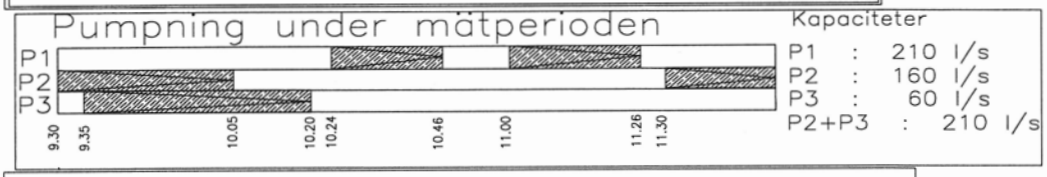
I mätdiagrammet i *figur 5.3* redovisas de uppmätta tryckserierna. De sträcker sig mellan ca kl 9.00 till kl. 12.00 ett vardagsdygn. Man kan tydligt se hur trycket ökar vid pumpstart och minskar vid pumpstopp. Speciellt då den största pumpen P1 stoppas sjunker trycket som synes momentant med ca 20-25 mvp i mätpunkt Tallbacksvägen för att sedan relativt snabbt återgå till en normal trycknivå.

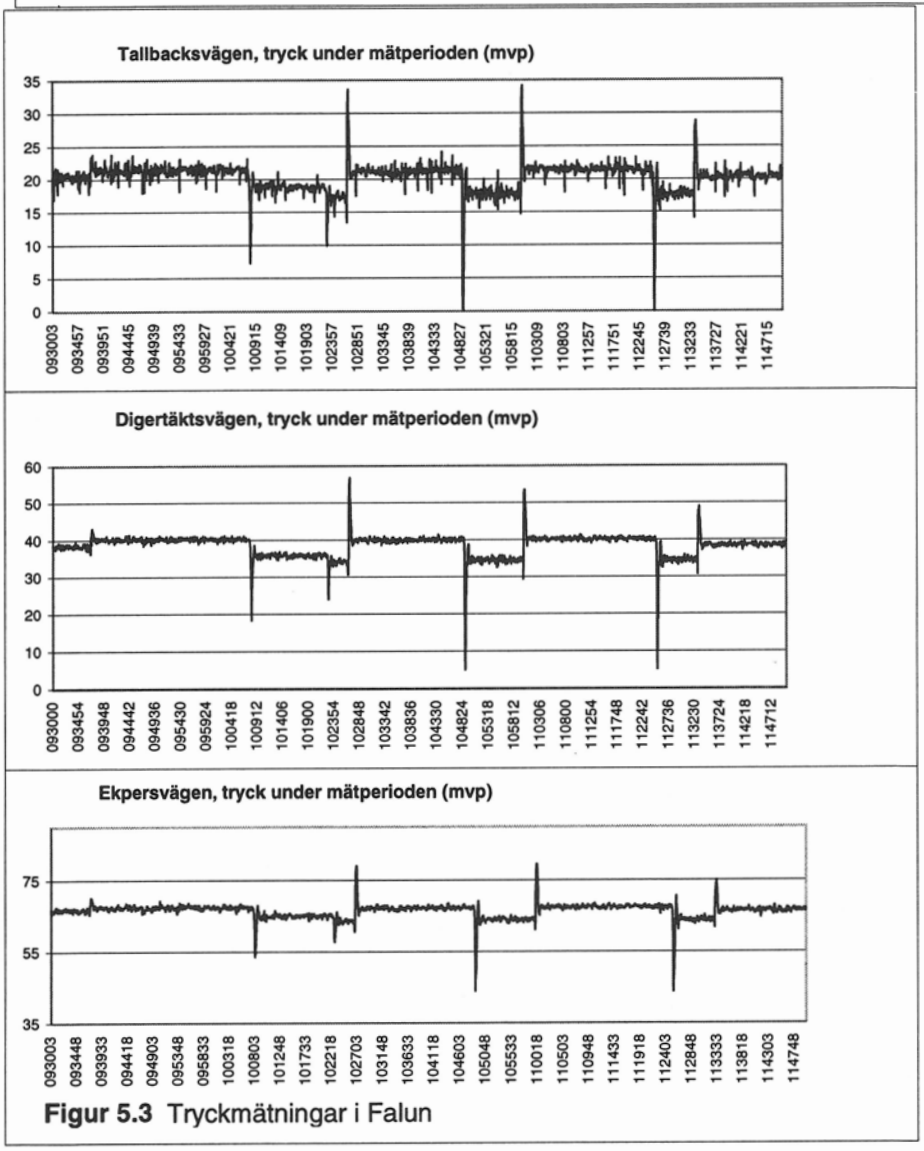
Tryckmätningen vid Tallbacksvägen visar också på hastiga tryckvariationer som inte kan hänföras till det pumpschema som användes. Dessa variationer kan hänföras till den ständigt pågående variationen som sker i vattenförbrukning samt att konsumenterna öppnar och stänger kranar runt om i vattenledningsnätet. I närheten av Tallbacksvägen finns dessutom en tryckstegringsstation. Eventuella tryckvågor från pumpdriften vid denna station kan i värsta fall interferera med de övriga ute på nätet och i så fall förstärka tryckvågorna. Kompletterande tryckmätningar bör genomföras för att utreda tryckstegringspumparnas påverkan på tryckbilden.

Tryckfallet vid t.ex. Tallbacksvägen kan betraktas i detalj då man uppförstorar detta. I *figur 5.4* har tryckfallet uppförstorats och man kan se att den negativa tryckvågen ej alls är momentan utan pågår i ca 20-30 sekunder. Beroende på våghastigheten tar det en viss tid för vågen att från vattenverket nå Tallbacksvägen vilket syns i *figurer 5.3 och 5.4* tillsammans. Hur lång tid det borde ta är svårt att bedöma. Som vi tidigare konstaterat beror våghastigheten av ett antal olika faktorer, bl.a. på det rörmaterial som vågorna färdas längs. Se avsnitt 2.4. Vågens utbredning till och från reflektionspunkterna sker ju genom samtliga ledningar på och längs sträckan. Eftersom ledningarna kan ha helt olika karakteristik, blir beskrivningen av vågens utbredning och dämpning komplicerad.

Eftersom upplösningen i mätserien är en registrering var 3:e sekund kan man tänka sig att det absolut minsta tryckvärdet ej har registreras i mätningarna. Detta har illustrerats i *figur 5.4* med en streckad linje för hur vågen kan ha sett ut i verkligheten. Vågen passerar här alltså nollstrecket och undertryck råder i ledningen. Som tidigare diskuterats i avsnitt 2.3 kan då insugning av substans utifrån ske om otäta fogar finns i den aktuella ledningen. En ytterligare diskussion om detta förs i avsnitt 6.6.



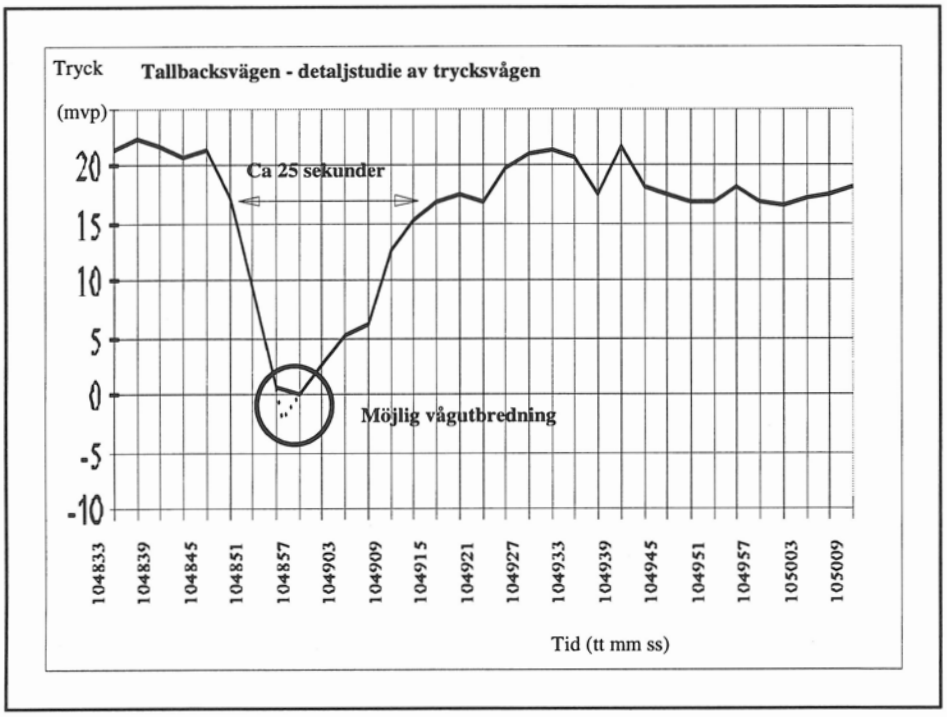




Figur 5.3 Tryckmätningar i Falun

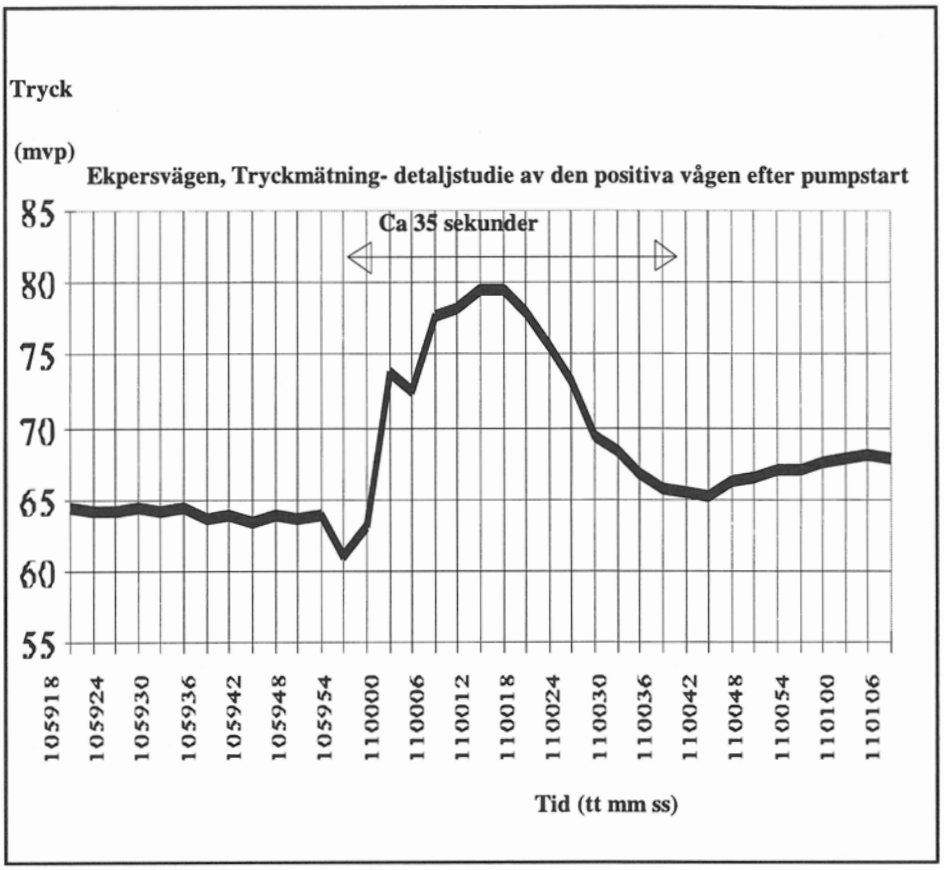
Pumpdriften under ett normaldygn visas i *figur 5.2*. Man ser att under ett dygn sker inte mindre än 4 pumpfrånslag och lika många pumptillslag. Detta betyder att på ett år inträffar nästan 1500 start och stopp av pumpar. Detta innebär en stor belastning på vattenledningsnätet och leder förr eller senare till ledningsbrott på grund av utmattning i rörmaterialet.

Pump P1 stoppas en (1) gång per dygn under ett normaldygn. Enligt resonemanget ovan kan det rådande trycket eventuellt understiga atmosfärstrycket. Låt oss anta att detta negativa tryck pågår ca 4 sekunder i olika punkter av vattennätet då pump P1 stoppas. På ett år betyder det ca 25 minuter undertryck i ledningen.



Figur 5.4 Tallbacksvägen-negativ tryckvåg efter pumpstopp vid vattenverket

En negativ tryckvåg följs av en positiv tryckvåg och omvänt. Då en pump startas utbreder sig en kraftig positiv våg med sin början efter pumpen. Denna utbreder sig därefter i vattennätet och en sådan har också uppmätts i mätserien. Speciellt studerar vi effekten i den lågt belägna punkten vid Ekpersvägen. Här har man alltså haft problem med till synes oförklarliga utlösningar av säkerhetsventiler och sprinklersystem. Den i *figur 5.3* till synes momentana positiva vågen har uppförstorats för närmare studier. Se *figur 5.5* nedan. Trycket höjs i mätpunkten med ca 15 meter och når upp till en tryckhöjd på ca 80 mvp vilket är mycket högt. Även denna vågfront dröjer sig kvar på en hög nivå i ca 20-30 sekunder. Man måste alltså vara medveten om detta faktum då man ställer in gränser för säkerhetsventiler m.m.



Figur 5.5 Ekpersvägen - positiv våg efter pumpstart

5.5 Beräkning av tryckslag med långsamtstängande ventil efter pumpen

Med anledning av de problem som konstaterats i ledningsnätet initierades år 1994 ett projekt för att beräkningsmässigt visa hur tryckvariationerna uppstår i ledningsnätet och hur de sprids i alla dess delar. Utgående från den pumpdrift som beskrivs i avsnitt 5.3 användes en uppbyggd datormodell för beräkningarna. För verifiering av beräkningsresultaten användes de tryckmätningar som beskrivs i avsnitt 5.4. Det primära syftet med projektet var att erhålla ett bra underlag till förslag på konkreta åtgärder mot för stora belastningar på vattenledningsnätet.

Ur de uppmätta resultatet valdes tillfället då pumpen P1 togs ur drift första gången kl 10.46 som direkt underlag till beräkningarna. Anledningen till att just ett stopp av P1 valdes var att denna pump är den största och ger upphov till den största negativa vågen.

INDATA TILL SIMULERINGEN

Pump P1

Pumpkurvan gäller för centrifugalpumpen av typ JMW modell Z24-307. Pumpen lyfter ca 70 meter vid ett flöde på ca 210 l/s ut från vattenverket. Massströghetsmoment, I = 1.10 kgm². Efter pumpen finns en backventil som stänger momentant då pumpen stannar.

Ventil efter pump

En långsamtstängande ventil med dimensionen 250 mm finns installerad efter pumpen. Ventilkarakteristik har hämtats från produktblad från tillverkaren. Ventilen antas stänga linjärt relativt tiden och har en stängningstid (fullt öppen till helt stängd) på 45 sekunder.

SIMULERINGSFÖRLOPP

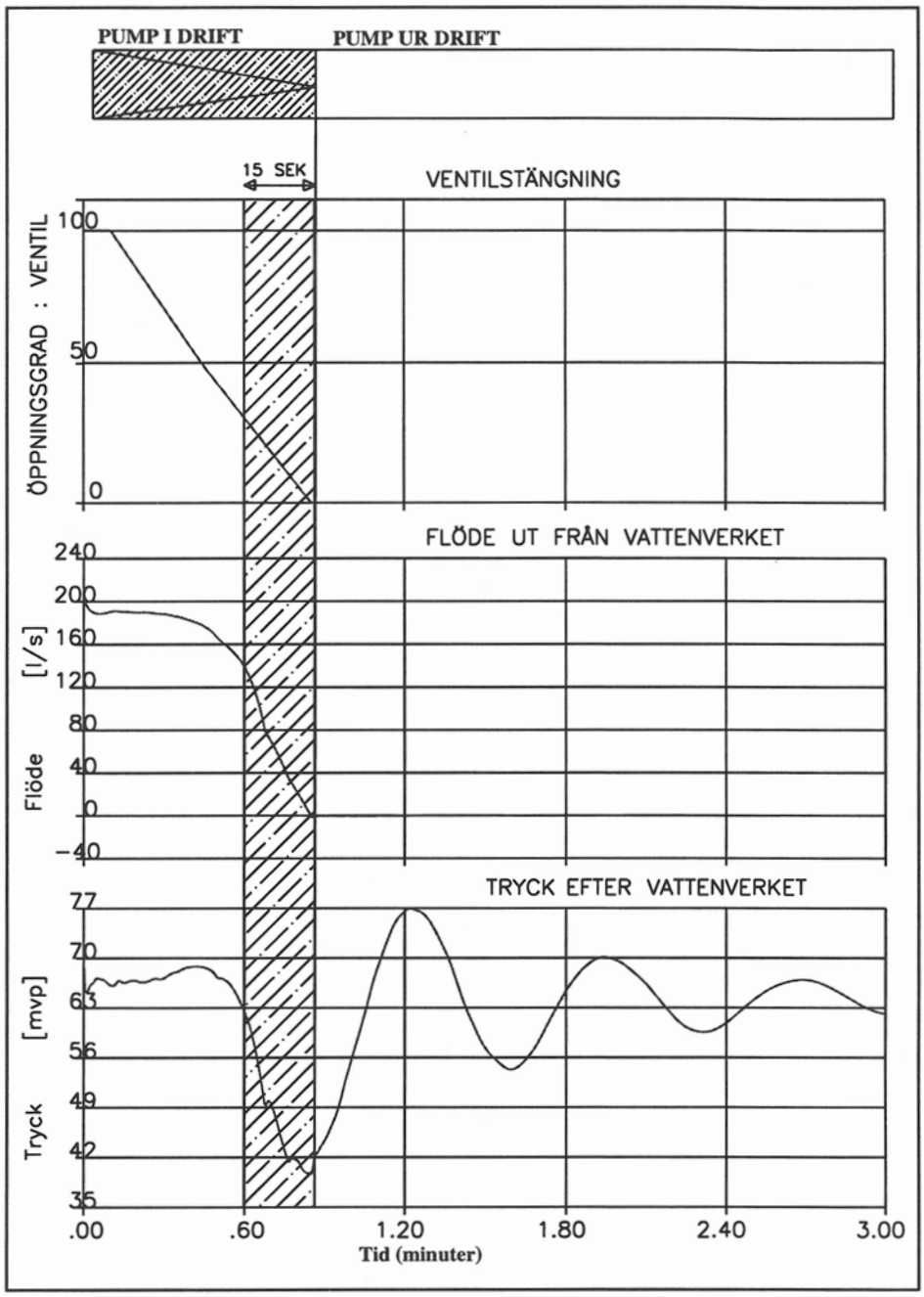
0 sek	Beräkningen startar med att pumpen P1 går för fullt
6 sek	Långsamtstängande ventil efter pumpen börjar stänga
51 sek	Långsamtstängande ventil helt stängd, pumpen stannar
180 sek	Simuleringen slut

Figur 5.1 visar det simulerade nätet.

ÖVRIGT

Under simuleringen råder hög förbrukning, ca 220 l/s, vilket är naturligt på morgonen då även mätningarna genomfördes. Reservoarerna står under avsänkning vid tillfället.

Våghastigheten har uppskattats till 800 m/s och har använts för modellens alla ledningar. Detta är ett ganska högt värde men valt med hänsyn till den stora andel gjutjärnsledningar som förekommer i vattenledningsnätet. Våghastigheten har kalibrerats för att ge en vågperiod som motsvarar den som uppmätts. Se avsnitt 2.4 för en närmare diskussion kring våghastighet i olika rörmaterial och faktorer som påverkar densamma. I *figur 5.6* redovisas simuleringsförloppet och hur den första negativa tryckvågen påbörjas direkt efter Falu vattenverk.



Figur 5.6 Simuleringsförlopp

5.6 Resultatdiskussion - jämförelser mätningar/beräkningar

Beräkningarna visar liksom mätningarna att det förekommer stora tryckvariationer i många delar av nätet i samband med ett pumpstopp. I *figur 5.6* ser vi hur flödet från vattenverket inte nämnvärt minskar i början av ventilstängningsfasen. Det är först då ventilen är till ca 70 % stängd (de sista 15 sekunderna) som flödet kraftigt börjar minska och planar ut till noll. Pumpen stannar då mot helt stängd ventil. I stort sett samma förlopp gäller för den negativa våg som påbörjas efter vattenverket. Som nämnts tidigare orsakas ju tryckvågen av en flödesändring varför vågen i stort följer flödesförloppet under den första dalen. Efter det att flödet från vattenverket (genom ventilen) planat ut till noll startas en positiv våg som även den orsakas av en flödesändring som sker ute på vattenledningsnätet.

Låt oss nu studera hur tryckvågorna sprider sig i vattenledningsnätet efter ett pumpstopp. *Figur 5.7* på nästa sida visar resultatet av simuleringen under 3 minuter enligt det simuleringsschema som beskrevs i föregående avsnitt. Överst i figuren visas ett tidsseriediagram på hur tryckvågen utvecklar sig i 4 olika punkter A, B, C och D i vattenledningsnätet. Punkterna finns utmärkta på planbilderna i figuren. De följande bilderna visar hela vattenledningsnätet och hur tryckvågor utvecklar sig i nätet under de tre minuter som simuleringen genomförts. 6 tidpunkter har valts ut för illustrationen. I exemplet har tryckvågorna som ger låga tryck med värden under 20 mvp studerats eftersom de i det här fallet förorsakar problem för konsumenterna och ledningarna.

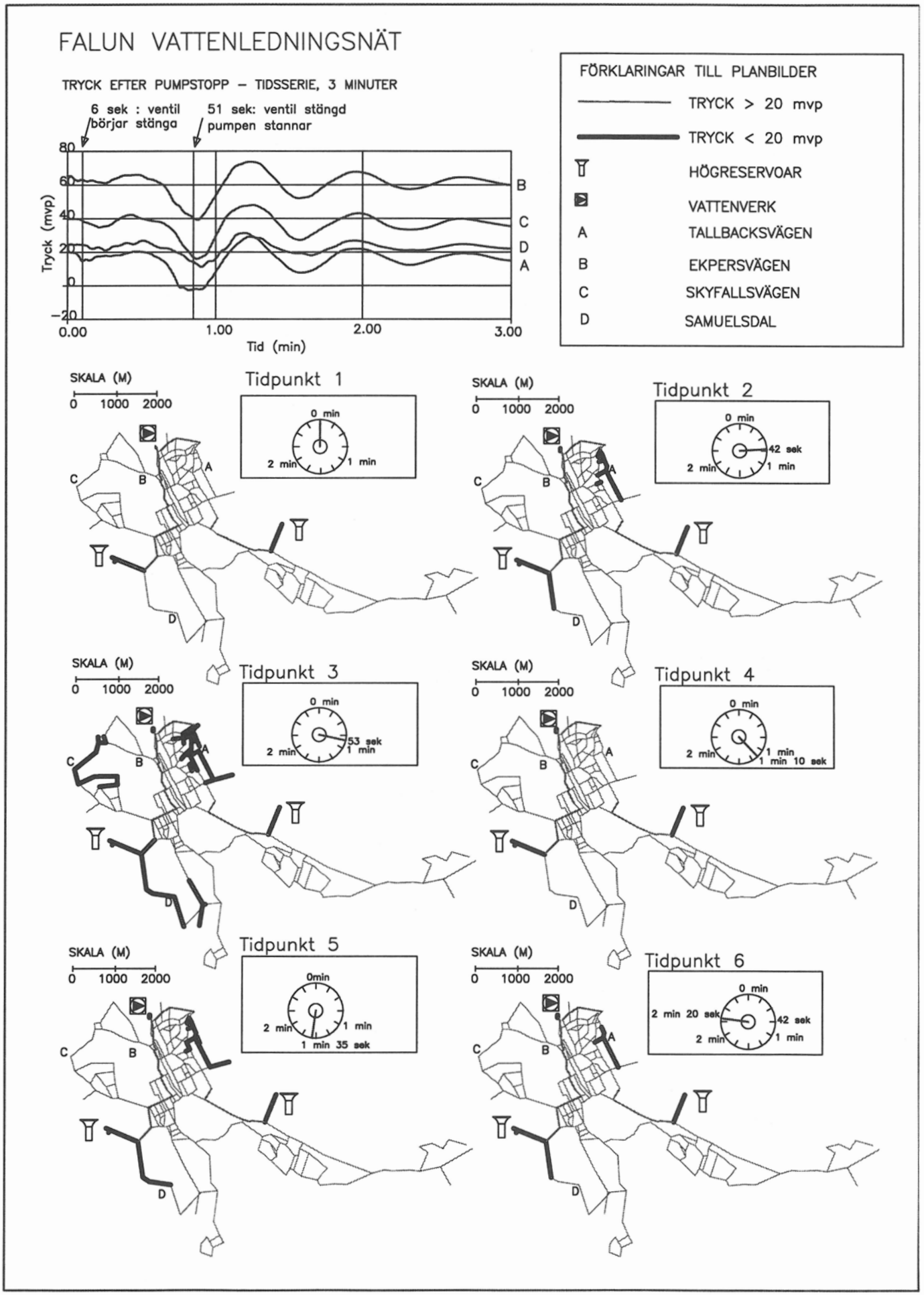
Vid tidpunkt 1 (0 min) råder ett normalt tryck (stationära förhållanden) i hela vattenledningsnätet. Som vi sett i tidigare avsnitt finns dock högt belägna områden som även normalt har på gränsen till för låga tryck för att konsumenten skall kunna erhålla något vatten. Det krävs praktiskt sett ett tryck på ca 15-20 mvp för att få ut vatten ur kranen hos abonnenten.

Som man kan se i tidpunkt 2 och speciellt 3 (42 respektive 53 sekunder) har den första negativa vågen spridits till stora delar av nätet. I de svartfärgade ledningarna är trycket lägre än 20 mvp. Den negativa vågen har alltså spridit sig långt ut i nätet redan före pumpfrånslaget och når sin kulmen några få sekunder efter detsamma. Den långsamt stängande ventilen som styr förloppet reducerar dock vågens amplitud betydligt och eliminerar effekten av det faktiska pumpfrånslaget. Ventilen stänger ju i samma ögonblick som pumpen slår ifrån.

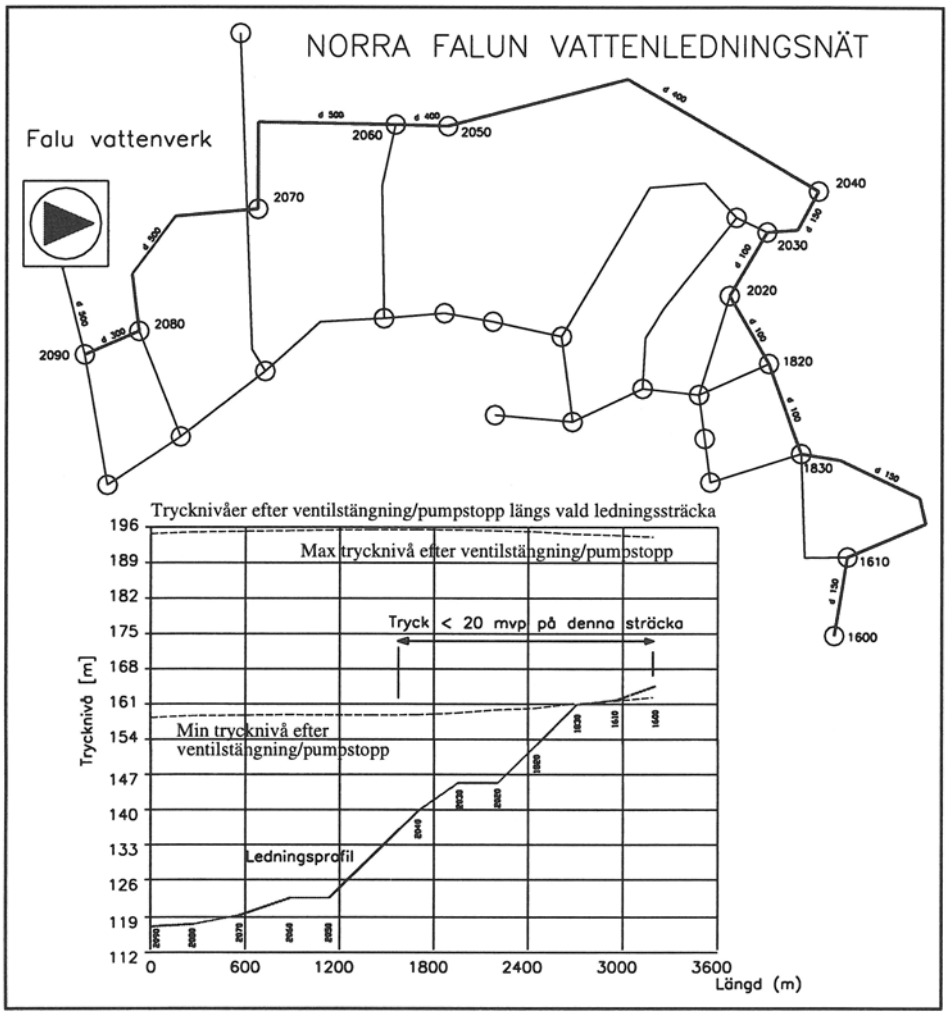
Den fjärde bilden (1 min och 10 sekunder) visar nätet under en positiv tryckvåg. I tidsseriediagrammet längst upp på bilden ser vi att denna positiva tryckvåg resulterar i tryckhöjder upp mot 75 mvp i punkt B, Ekpersvägen. Det är ganska höga tryck som pågår under ett antal sekunder. Här har man som tidigare nämnts mycket riktigt också haft problem med utlösande säkerhetsventiler mm.

De två sista bilderna (1 min 35 sek resp 2 min och 20 sek) visar den andra och tredje negativa tryckvågen efter ventilstängning/pumpstopp. Samma områden fast färre ledningar än tidigare är drabbade av det låga trycket under dessa negativa vågor.

I *figur 5.8* redovisas beräkningsresultatet för en utvald ledningssträckning i norra vattenledningsnätet. Den valda sträckan sträcker sig från en punkt direkt efter vattenverket och slutar i en punkt nära Tallbacksvägen i östra delen av staden där även tryckmätningar genomförts. Som man ser så varierar ledningens höjd kraftigt längs sträckan och är som högst vid Tallbacksvägen. Bilden visar på ett illustrativt sätt att det framförallt är de högt belägna delarna som löper störst risk att utsättas för låga tryck och till och med undertryck i ledningarna.



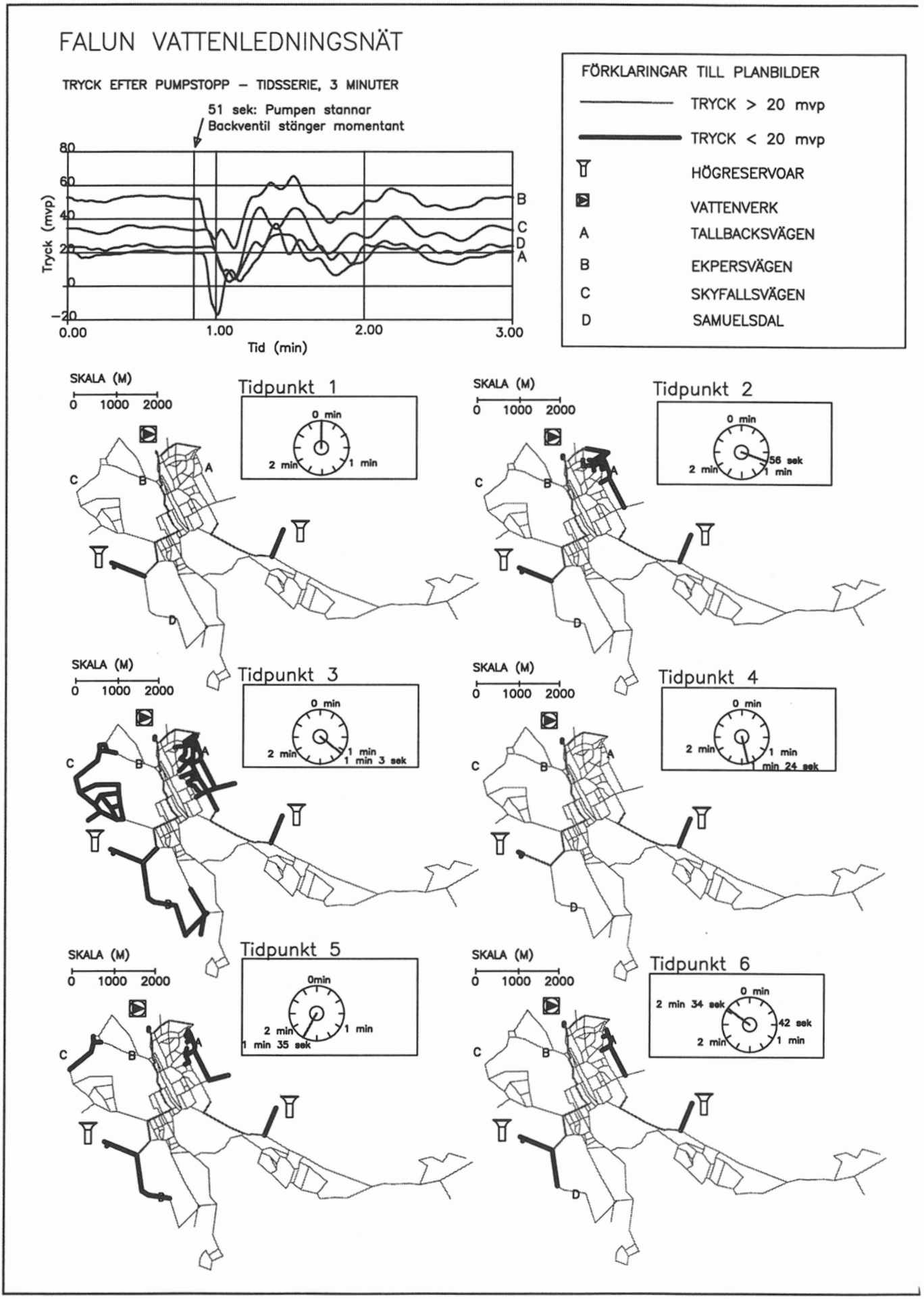
Figur 5.7 Pumpstopp mot långsamtstängande ventil



Figur 5.8 Trycknivåer längs en utvald ledningssträcka, norra Falun

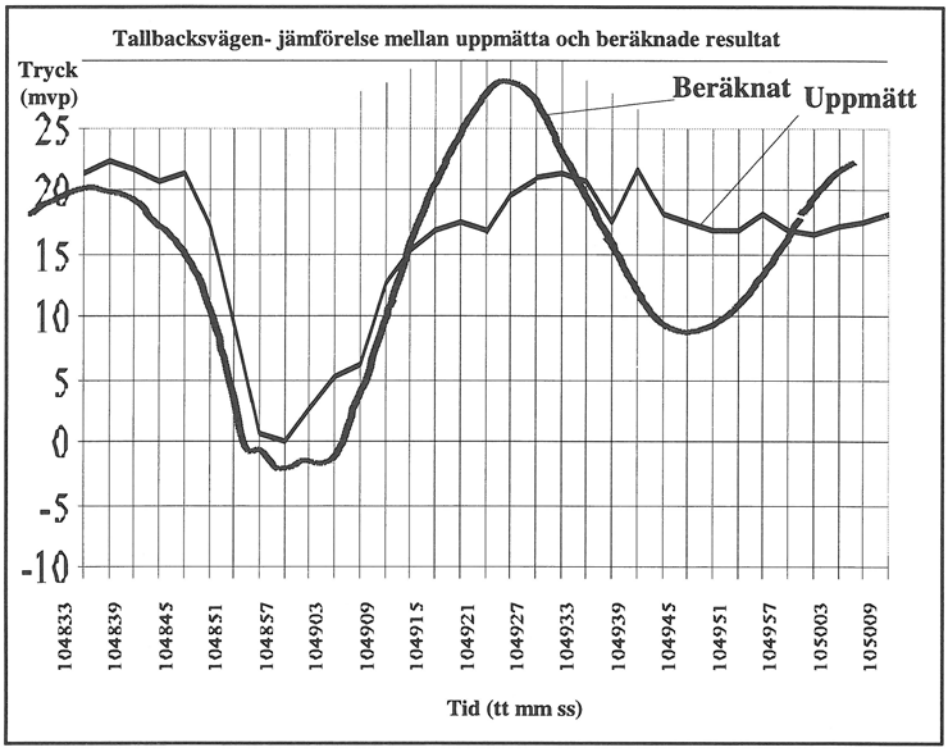
I det simulerade fallet fanns som beskrivits förutom backventil en långsamtstängande ventil som skyddar mot tryckslag efter pumpen. För jämförelse genomfördes en simulering utan en sådan ventil. Fallet beskriver i princip vad som kan hända vid strömavbrott. Pumpfrånslaget sker helt abrupt med en momentant stängande backventil. Resultatet visas i *figur 5.9* där motsvarande resultat som för den tidigare simuleringen åskådliggörs. Tidpunkterna har som i det tidigare fallet valts för kunna följa vågfronten under de tre minuter som simuleringen pågår. Pumpen stannar efter 51 sekunder.

Den negativa vågen är kraftigare i samtliga punkter och fler ledningar än i det tidigare fallet erhåller låga tryckhöjder. Vid Tallbacksvägen når vågen ner till mycket låga värden under nollstrecket. Kavitation inträffar redan vid -8 mvp (se avsnitt 2.3). Kavitationsmöjligheten har inte simulerats. Det simulerade exemplet belyser det viktiga i att ha någon form av skydd mot tryckslag vid vattenverket. Effekterna kan annars bli förödande då t.ex. pumpar startas och stoppas eller vid hastiga ventilmanövreringar.



Figur 5.9 Pumpstopp mot momentant stängande backventil

Vad gäller verifieringen av de simulerade resultaten i fallet med långsamt stängande ventil, visar de på relativt god överensstämmelse med de genomförda mätningarna. Se *figur 5.10*.



Figur 5.10 Tallbacksvägen, beräknade och uppmätta resultat, pumpstopp mot långsamtstängande ventil vid vattenverket.

I ett avseende skiljer sig mätningar och beräkningar åt. Den positiva våg som följer på den första negativa vågen är nämligen något kraftigare beräkningsmässigt än i verkligheten. Detta tyder på att det i verkligheten finns en dämpningseffekt på vågfronterna som ej slår igenom i beräkningarna. En viktig förklaring är att det i verkligheten finns ett antal kranar öppna hos konsumenterna vilka fungerar som utjämnande reflektionspunkter för tryckvågorna. Modellen tar ej hänsyn till dessa.

Andra osäkerheter i simuleringens indata är:

- Elasticitetsmodulen (ej beskriven för varje enskild ledning i modellen)
- Stängda ventiler i ledningsnätet som man ej haft kännedom om
- Råhet i ledningar (ledningarnas invändiga kondition ej känd)

I verkligheten försvagas alltså amplituden på ett tidigare stadium än vad som visas på utbrednings bilderna i figurer 5.7 samt 5.9. I avsnitt 2.4 diskuteras faktorer som påverkar vågutbredningen.

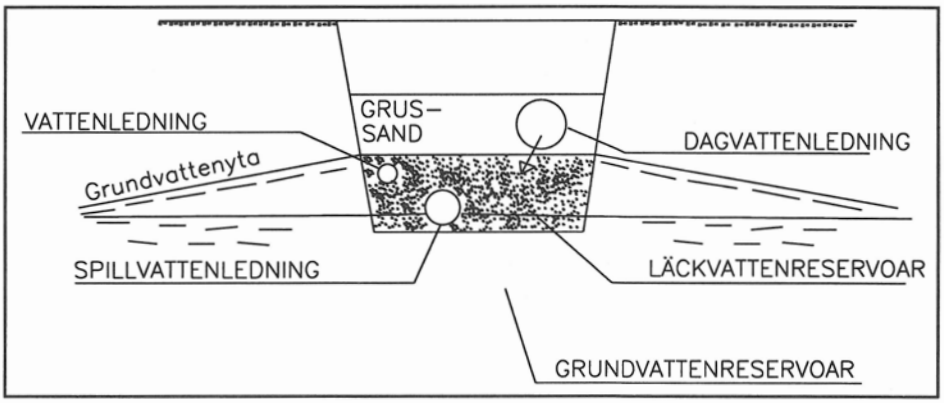
5.7 Undertryck i ledningar

Resultat och mätningar visar att det förekommer låga tryck mindre än 20 mvp i vissa ledningar som kan pågå under så pass lång tid för att vara märkbara hos konsumenten. Det är helt enkelt svårt att erhålla vatten från

kranen under kortare perioder.

Ett ännu allvarligare problem som i princip konstaterats förekomma genom detta projekt är att det faktiskt kan förekomma undertryck (< 0 mvp) i en vattenledning. Detta ter sig vid första tanken osannolikt eftersom vattensystem principiellt är konstruerade för att alltid stå under övertryck relativt atmosfärstrycket. Under de få sekunder som undertrycket fortgår kan det ske insugning av partiklar och förorenat vatten utifrån om t.ex. otäta fogar finns i närheten av det område där undertrycket uppstår. En sådan inträngning kan i slutänden orsaka konsumenten skada.

I *figur 5.11* nedan visas en vanlig sektion av en rörgrav med spillvattenledning, dagvattenledning samt vattenledning. Om grundvattenytans läge tillfälligtvis ligger ovanför vattenledningen kan, om spillvattenledningen läcker, förorenat vatten nå upp till vattenledningen. I samband med ett undertryck i vattenledningen kan samma förorenade vattenmängd tränga in i vattenledningens eventuella otäta fogar.



Figur 5.11 Profil över ledningsgrav

5.8 Diskussion och åtgärder

Följande åtgärder har föreslagits och i viss mån vidtagits i Falun för att komma till rätta med problemet med tryckvariationer.

❒ Varvtalsreglerad pumpning
Åtgärden resulterar i att man kraftigt minskar de tryckvariationer som tidigare förekommit i nätet. Detta är den principiellt viktigaste åtgärden. Risken för strömavbrott kvarstår dock, mot vilken man måste vidta skyddsåtgärder, t.ex. installation av en luftklocka.

❒ Mikrobiologisk provtagning
För att konstatera om eventuell inträngning av substans utifrån har skett i ledningar med undertryck föreslås kompletterande mikrobiologisk provtagning. Åtgärden har genomförts men man har inte kunnat konstatera någon sådan inträngning.

❒ Högzoner

I områden inom lågzonen som har konstant låga tryck, bör man överväga att åstadkomma lokala tryckstegringar. Detta för att undvika eventuella vacuumsituationer i ledningarna.

❒ Tryckgränshöjning för säkerhetsventiler

Primärt har studier och mätningar visat varför till synes oförklarliga utlösningar av säkerhetsventiler sker i nätet. Orsaken är att höga tryck uppkommer i de aktuella områdena. Åtgärden att höja tryckgränser, skall naturligtvis diskuteras utifrån denna nyvunna kunskap innan den genomförs.

❒ Kompletterande tryckmätningar

Tryckmätningen vid Tallbacksvägen har skapat misstanke om att den närliggande tryckstegringsstationen som höjer trycket österut ytterligare kan förvärra trycksituationen i lågzonen. Start eller stopp av pumpar i denna station kan förstärka eventuella samtidiga tryckvariationer. För att komma underfund med om så är fallet, bör kompletterande tryckmätningar genomföras närmare tryckstegrings-stationen. Driften av stationen bör väljas med omsorg och framförallt koordineras med driften vid vattenverket.

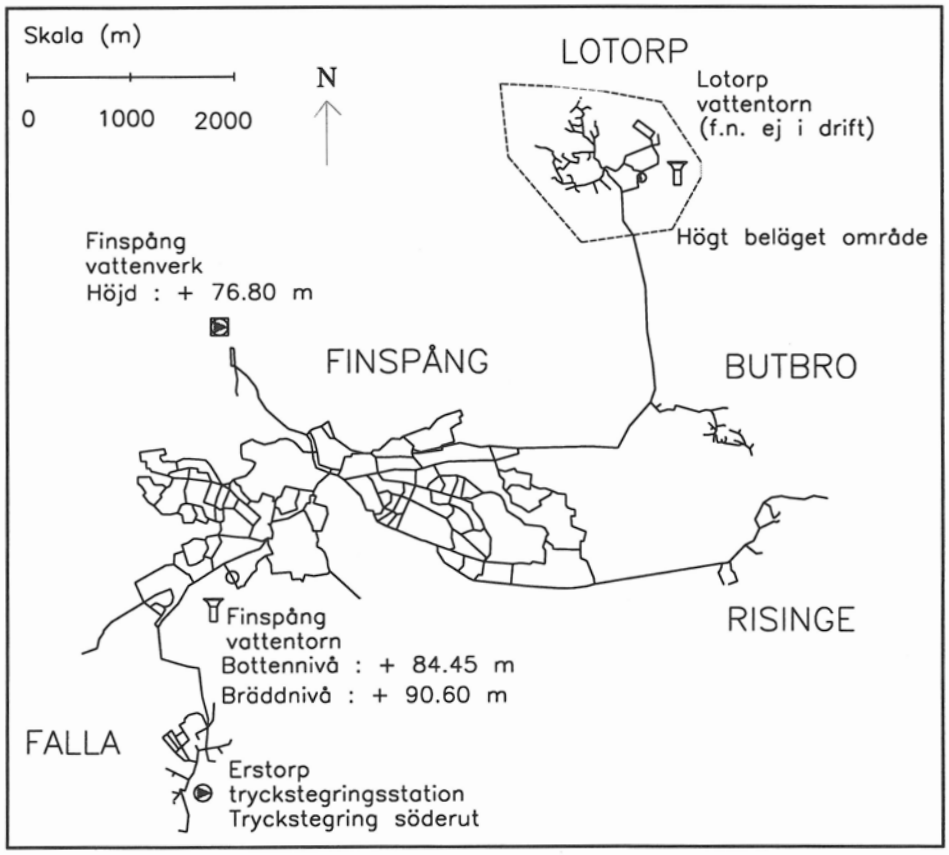
❒ Uppföljning av läckstatistik

Inrapporterade läckor bör följas upp år för år så att en god bild erhålles över var och när i vattenledningsnätet sådana sker som mest. Utifrån en sådan kunskap kan åtgärder sedan sättas in i det aktuella området.

6. EXEMPEL 4 - FINSPÅNG VATTENLEDNINGSNÄT

6.1 Beskrivning och kort historik

I Finspång finns ett vattenverk, Bleken i norra delen av staden. En högreservoar finns i den södra delen av staden. Från Finspång utgår överföringsledningar till separata samhällen. *Figur 6.1* visar vattenledningsnätet inklusive vissa ytterområden. I Lotorp nordost om tätorten finns en högreservoar som är tagen ur drift p.g.a. dålig invändig och utvändig kondition.

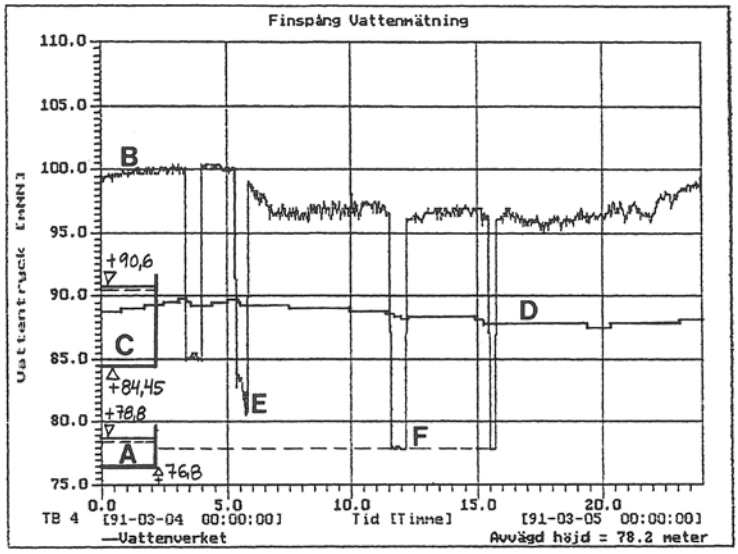


Figur 6.1 Finspång vattenledningsnät

Flera projekt har genom åren genomförts för att analysera olika problem i vattenledningsnätet. Dessa har varierat från specifika vattenkvalitets-problem till synes omotiverade tryckvariationer i nätet. Finspång har på senare år förändrat pumpdriften vid vattenverket från att ha varit utformad med traditionell start- och stoppdrift mot nivå i högreservoaren till att vara varvtalsreglerad. Förändringen genomfördes år 1991. Vi skall i detta exempel belysa hur man med en sådan åtgärd kunde begränsa statiska och dynamiska tryckvariationer i vattenledningsnätet. Därigenom lyckades man bl.a minska antalet läckor och på så sätt spara mycket pengar.

6.2 Pumpdrift och trycksituation vid vattenverket och i ledningsnätet

Här beskrivs pumpdriften vid Bleken vattenverk som den såg ut före november 1991 och som ligger till grund för detta exempel. Vid vattenverket fanns 3 konstantvarviga pumpar vars start och stopp styrdes mot nivå i högreservoaren. Pumparna tar vattnet från en närbelägen lågreservoar. I *figur 6.2* redovisas ett diagram som visar utgående trycknivå vid vattenverket under ett dygn.



Figur 6.2 Tryckmätning utanför Bleken vattenverk

Förklaringar:

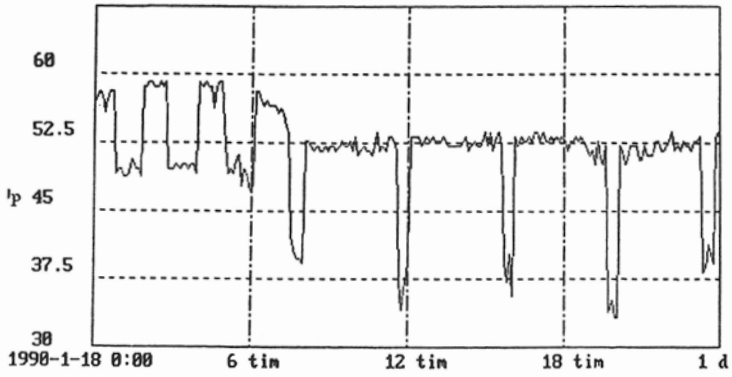
A. Lågreservoar vid vattenverket
B. Trycknivå utanför vattenverket (Pumparna i drift)
C. Finspång vattentorn
D. Vattennivå i Finspång vattentorn
E. Ingen utströmning från vattenverket (pumparna ur drift)
F. Utströmning med självfall från vattenverket

Som man kan se föreligger stora skillnader vad gäller det statiska trycket beroende på om pumparna är i drift eller inte. Verket är utformat så att det finns möjlighet för vattnet att med självfall rinna ut från lågreservoaren. Vid de två första pumpfrånslagen kl. 3.30 och 5.30 försörjes hela staden av vattentornet. Detta beror på att trycknivån utanför vattenverket ligger högre än nivån i lågreservoaren.

Det är naturligt att trycket i vattenledningsnätet sjunker mer dagtid än under natten eftersom vattenförbrukningen är större på dagen. Vid pumpfrånslagen som sker dagtid kl 12 och 15.30 kommer t.o.m. trycknivån vid vattenverket att falla under nivån i lågreservoaren. Vatten kommer vid dessa tillfällen alltså att med självfall rinna ut i nätet.

De statiska tryckskillnaderna kan också påvisas ute på vattenledningsnätet.

I *figur 6.3* redovisas en tryckmätning med relativt låg tidsupplösning som genomfördes i överföringsledningen till Lotorp och som täcker ett helt dygn. Trycket faller ca 18-20 meter som mest då pumpen tas ur drift dagtid.



Figur 6.3 Tryckmätning i Lotorp

Lotorp är ett av de samhällen som är högst beläget. Detta ställer till problem då pumpar körs på start och stoppdrift. Pumpstopp kan medföra att det finns risk att abonnenterna blir utan vatten vid vissa tillfällen. Som nämnts finns ett gammalt avställt vattentorn i Lotorp. Förutom att tornet har dålig utvändig och invändig kondition är det för lågt och kan inte förse samhället med det tryck som är nödvändigt för att upprätthålla god försörjningsgrad till konsumenten.

De tryckvariationer som fångats upp av mätarna kan sägas vara statiska och beror på pumpdriften vid vattenverket. För att påvisa de snabba dynamiska tryckvariationerna som förmodligen pågår i direkt samband med start och stopp av pumpar måste man som i Falun genomföra mätningar med hög tidsupplösning (ev. sekundupplösning). Detta har dock ej genomförts i Finspång.

Som tidigare nämnts kan upprepade lastväxlingar som alltså sker i vattenledningsnätet förorsaka skador på ledningar och fogar. Detta visade sig också ske i Finspång i form av läckor i vattenledningsnätet.

6.3 Införande av varvtalsreglerad pumpning

För att reducera de statiska och dynamiska lastväxlingarna i anläggningen infördes i november 1991 varvtalsreglerad pumpning vid vattenverket. Pumpningen blev alltså avsevärt mycket jämnare och mer anpassad till den aktuella vattenförbrukningen i staden.

6.4 Resultat av den förändrade pumpdriften

Redan efter ett år kunde man konstatera reella resultat av den förändrade pumpdriften. Antalet läckor sjönk år 1993 till ca 5 från att ha varit ca 20 år 1992. Under 1994 hade från januari till september 2 läckor rapporterades. En mycket tydlig minskning av antalet läckor har alltså skett efter det att pumpdriften förändrades.

En kostnadsbesparing har gjorts tack vare det minskade antalet läckor och kan grovt beräknas enligt följande :
20 läckor / år x 20 000 kr / läcka = 400 000 kr / år
Investeringen i varvtalsreglerad pumpning har alltså lönat sig ordentligt.

Orsaken till en vattenläcka är naturligtvis en kombination av många olika faktorer. Några av dem kan vara

- ojämna sättningar
- tjälskador
- yttre korrosion
- vibrationer av tung trafik

Dessa faktorer i kombination av utmattning av ledningsmaterial på grund av tryckvariationer kan i slutänden resultera i en vattenläcka.

6.5 Beräkning av tryckslag vid pumpstopp med långsamtstängande ventil efter pumpen

I den tryckmätning som visas i *figur 6.3* visas tryckvariationen under ett dygns tid. Upplösningen är allt för grov för att eventuellt urskilja snabba tryckslagseffekter i nätet. För att påvisa huruvida det förekommer snabba förlopp vid t.ex ett pumpstopp har en simulering genomförts med LICWATER Dynamisk. Simuleringen har endast utförts för att ingå i detta exempel och har utförts med en fiktiv pumpkurva som uppfyller de krav på uppfordringshöjd och flöde som finns vid vattenverket. En långsamtstängande ventil med karakteristik liknande den i förra exemplet, Falun, har använts i detta exempel. Simuleringen utgår från följande förutsättningar:

SIMULERINGSFÖRLOPP OCH INDATA

- Initialt pumpflöde vid vattenverket = 66 l/s
- Förbrukningen medelhög ute på nätet.
- Ventilen börjar stänga efter 6 sekunder och är helt stängd efter 51 sekunder.
- Stängningsförloppet är linjärt och sker alltså under 45 sekunder.
- Pumpstopp sker moment efter 51 sekunder.
- Våghastigheten har uppskattas till 800 m/s. Detta beroende på att många olika ledningsmaterial förekommer.

I *figur 6.4* redovisas resultatet av denna simulering.

6.6 Resultatdiskussion

Lotorp, det nordligaste av de kringliggande samhällena, erhåller de lägsta trycken viket är naturligt eftersom det också är det högst belägna. Resultatet bekräftar ytterligare tillsammans med tryckmätningen i *figur 6.3* att Lotorp borde ha problem med för låga tryck i vissa områden. Normalt tryck är ju faktiskt inte högre än 30 mvp vilket är lågt med tanke på de tryckfall som kan ske i samband med t.ex. start och stopp av pumpar vid vattenverket. Åtgärden i Lotorp borde vara att införa lokal tryckstegring i utsatta områden. Det avställda vattentornet räcker som nämnts inte till för att åstadkomma tillräckliga tryck i nätet.

I Butbro och Risinge sker motsvarande tryckvariationer som i Lotorp fast inte lika kraftigt. En viss tidsförskjutning finns för den negativa vågen mellan de tre områdena. Detta beror naturligtvis på att områdena ligger på olika avstånd från vattenverket, källan till tryckvågorna.

I Butbro och Risinge har vågfronten en kortare period än i Lotorp. Detta kan bero på att vågorna reflekteras i andra punkter i dessa områden.

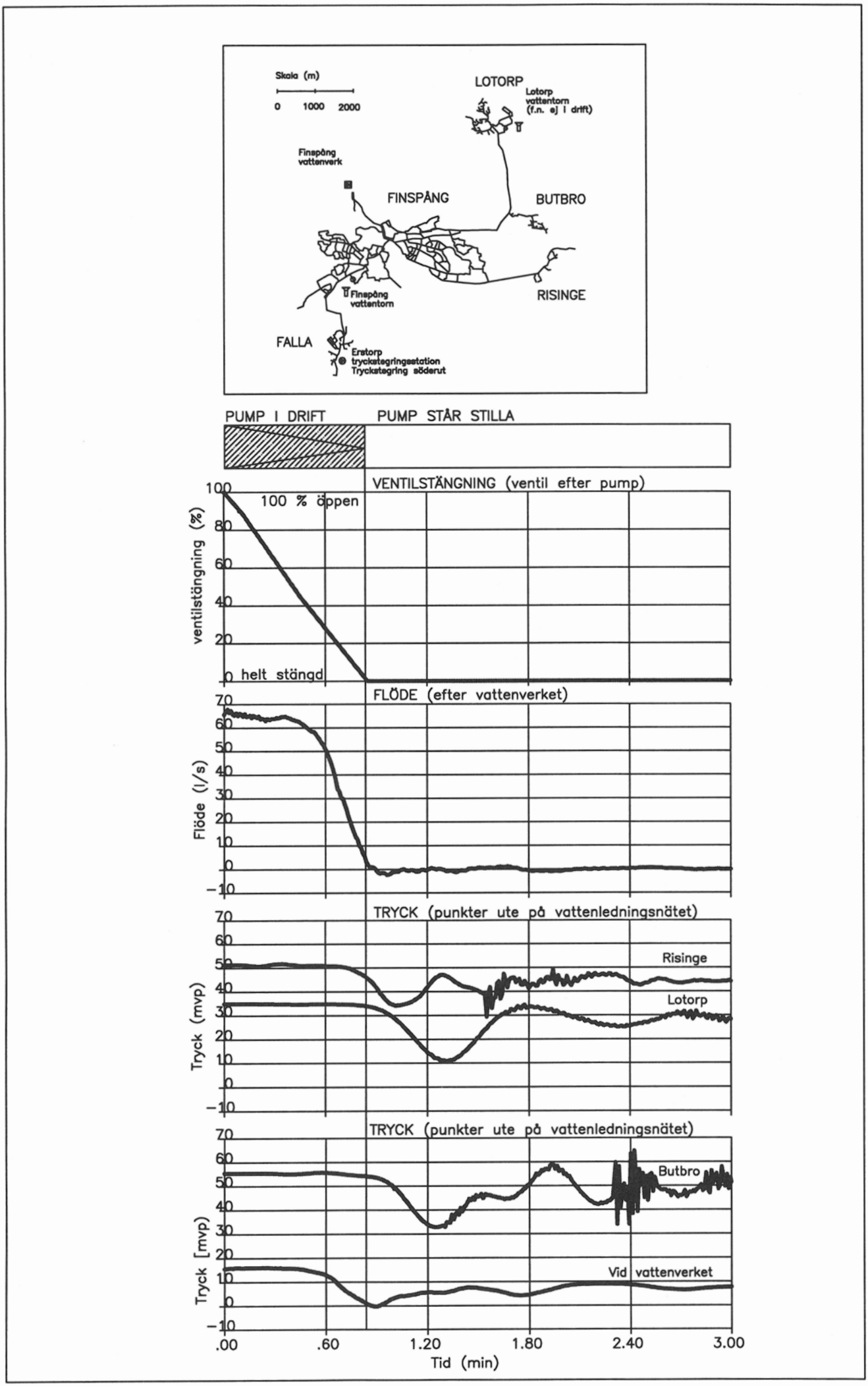
Vid vattenverket erhålls negativa tryckvärden relativt atmosfärstrycket. Det uppkommer undertryck i ledningen. Vågutbredningen dör sedan ut ganska snabbt. I verkligheten kan ju som visas i *figur 6.2* vattnet ta sig med självfall från lågreservoaren. Detta minskar naturligtvis risken för skador p.g.a. tryckslag eftersom utströmning från lågreservoaren kommer att sakta ned flödesändringen i systemet. Utströmningsmöjligheten har dock inte simulerats. Det enda skyddet mot tryckslag som lagts in i simuleringen är den långsamtstängande ventilen efter pumpen.

Exemplet visar i all tydlighet nyttan av att se och tänka över funktionen av driften i anläggningen och kanske börja ifrågasätta invanda driftsätt vid vattenverken. I Finspång har ju ett mycket gott resultat av den omlagda driften erhållits i form av en minskning av antalet läckor. Man har kunnat göra en betydande kostnadsbesparing.

6.7 Åtgärder

Följande åtgärder har föreslagits i Finspång under årens lopp :

❒ Varvtalsreglerad pumpning vid vattenverket - infört 1991. Åtgärden har resulterat i en dramatisk minskning av antalet läckor.
❒ Lokal tryckstegring bör övervägas mot högt belägna områden som har dåligt tryck och därmed svårt att erhålla vatten.
❒ Läckstatistik skall noga följas upp varje år så att en god bild erhålles över områden med problem.
❒ Läcksökningsplaner skall upprättas. Detta kan göras genom att t.ex. dela upp vattenledningsnätet i separata delar.



Figur 6.4 Beräkningsresultat i punkter ute på vattenledningsnätet

7. BERÄKNINGSPROGRAM

7.1 Matematiska beräkningsmetoder

Dynamiska förlopp beräknas ofta numeriskt. Beroende på förloppets karaktär används stel eller elastisk teori. Stel teori kan användas vid en relativt långsam flödesändring, då tiden för denna är åtskilligt längre än 2L/a vilket motsvarar tryckvågens reflektionstid. Vid stel teori tas ingen hänsyn till elasticiteten hos rörväggar och vatten. Stel teori kan vara tillämpligt vid t.ex. svallningsförlopp.

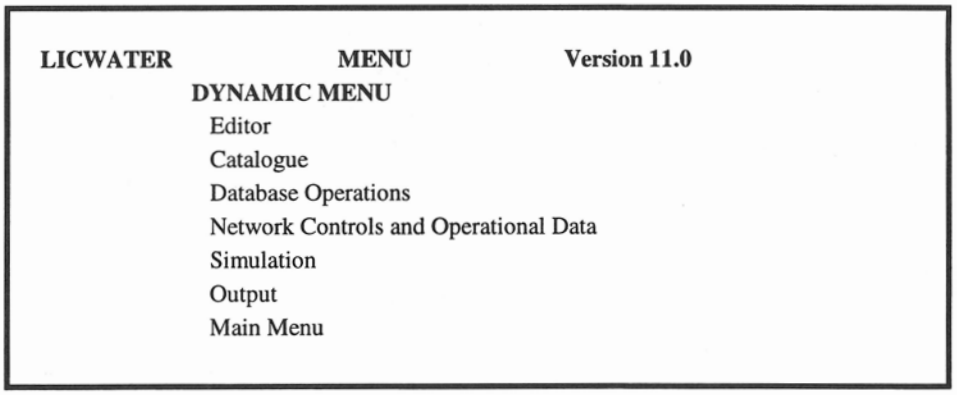
Dynamiska förlopp är dock normalt så snabba att man är tvungen att använda s.k. elastisk teori där alltså elasticiteten hos vatten och rörväggar tas med i beräkningen. En vanlig numerisk metod som används är karakteristikmetoden. Denna utnyttjar rörelse- och kontinuitets-ekvationerna för att lösa systemet. Se vidare VAV, P58, 1988 eller annan facklitteratur för en beskrivning av metoden. I många av de datorprogram som används idag för dynamiska beräkningar, utnyttjas karakteristikmetoden.

7.2 LICWATER

LICWATER är utvecklat av LICconsult A/S, Danmark. Från att tills nyligen varit helt DOS-baserat, är LICWATER i sin nuvarande form utformad för operativsytemen Windows 3.11, Windows NT eller Windows95. LICWATER Dynamisk är en dynamisk modul till huvudprogrammet LICWATER.

I avsnitt 2.8 redogörs principiellt hur en dynamisk beräkning går till med denna modul. För att ge en inblick i hur man praktiskt arbetar med programvaran, gås i det följande kort igenom de menyval som tillämpas.

Nedan visas den dynamiska huvudmenyn som den ser ut i LICWATER Dynamisk (DOS version). Efter att ha genomfört en stationär beräkning, använder man sedan denna meny för att gå vidare med dynamiska studier.



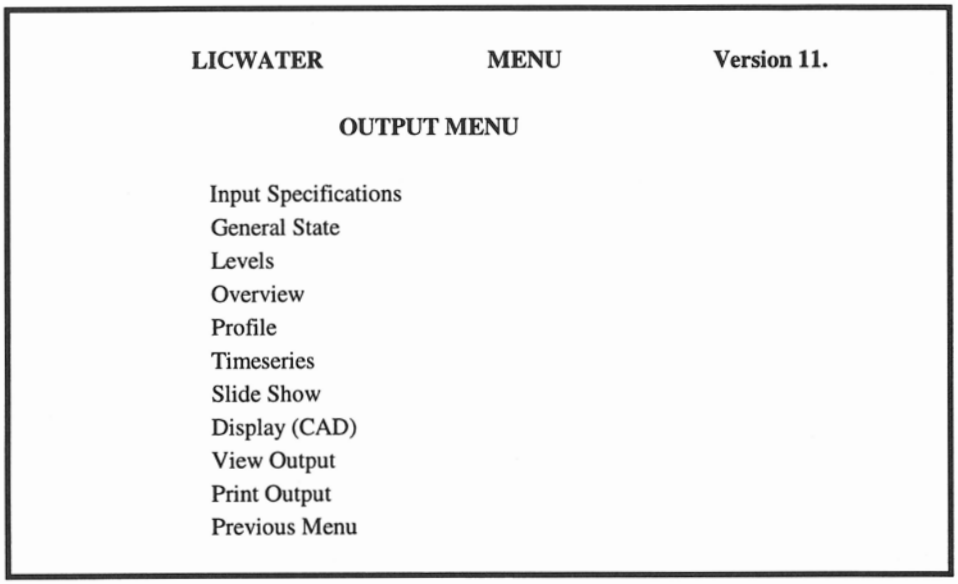
Figur 7.1 Huvudmeny i LICWATER Dynamisk

De viktigaste menyvalen kommer i det följande att gås igenom.

Editorn erbjuder möjligheter att gå in i och ändra ASCII text-filer. T.ex. kan indata till den dynamiska beräkningen förändras på ett enkelt sätt.

Simulation - alternativet innebär valet för dynamisk beräkning. Här anges den stationära resultatfilen från vilken den dynamiska beräkningen skall starta. Denna är dessutom kopplad till en indatafil där det dynamiska händelseförloppet finns beskrivet. Se även avsnitt 2.8.

Output-valet erbjuder i sig en hel meny där hela resultatpresentationen sker. Denna separata meny visas i figur 7.2 nedan.



Figur 7.2 Output meny i LICWATER Dynamisk

Level : Här kan intervallplottar (planplottar) genereras över olika parametrar såsom flöde, tryck, trycknivå vid valda tidpunkter under simuleringsperioden.

Overview : Här visas en sammanfattning av resultatet från simuleringen där genererade resultat presenteras knutpunktsvis i grafikplottar.

Profile : Här kan man välja enskilda ledningar eller ledningsslingor i sitt ledningsnät för kontroll av t.ex. flödets eller tryckets utbredning i dem vid en bestämd tidpunkt. Man kan också erhålla kurvor med uppkomna maximala tryck eller trycknivåer utefter den valda sträckan för den simulerade tidsperioden.

Timeseries : Det kanske mest användbara valet. Här kan tidsserier över t.ex. tryckets eller flödets variation i enskilda punkter studeras. Man får av framtagna resultatbilder en bra uppfattning om när extrema situationer uppträder samt hur de olika förloppen dämpas med tiden. Många av de resultat som presenteras i tidigare avsnitt av denna rapport är sådana tidsserier.

Slide show : En serie av intervallplottar (plan plottar) läggs ihop till en s.k. slide show. Denna kommer att fungera som en animering som visar hela

händelseförloppet direkt på dataskärmen. De olika intervallen presenteras i form av olika färger.

View and Print output : Här kan tryck- och flödesresultat från olika tidpunkter beskådas i tabellform i valda format samt skrivas ut direkt.

Display CAD : Eftersom LICWATER har en direkt koppling till AutoCad kan samtliga resultatbilder som produceras i alla menyval sparas i form i dxf-format och åskådliggöras i AutoCAD. Detta erbjuder ju också i sin tur möjligheter till redigering av resultatbilder för speciella ändamål.

7.3 PICCOLO

PICCOLO är ett franskt datorprogram, utvecklat av Safege. Det används främst för stationära beräkningar i vattenledningsnät. Programmet har liksom LICWATER dessutom en kvalitetsmodul där man bl.a. kan följa vattnets väg direkt på datorskärmen och därmed få en uppfattning om hur lång tid det tar att omsätta vattnet i hela vattenledningsnät. Programmet har länge varit DOS-baserat men har under år 1997 övergått till att bli Windows-baserat (Windows 3.11, Windows-95, Windows NT). I VA-FORSK rapport nr 1993-13, beskrivs PICCOLO detaljerat och hur programmet används i hydrauliska beräkningar för hela vattenledningsnät.

Det finns idag en dynamisk modul, Pendulo, som utnyttjar stationära resultat från PICCOLO som indata till de dynamiska beräkningarna. Idag finns få eller inga användare av Pendulo i Sverige. I *figur 7.3* redovisas en meny från Pendulo (DOS-versionen).

```
*                                                                    *
*                    .GENERAL MENU.                                  *
*
*************************************************************************

*                (1) .PROJECT DIRECTORY.                             *
*                (2) .STUDIED MODEL.                                 *
*                (3) .PENDULO EDITOR.                                *
*                (4) .NETWORK CHECKING.                              *
*                (5) .CALCULATION.                                   *
*                (6) .RESULTS INTERPRETATION.                        *
*                (7) .ACCESS TO DOS.                                 *
*                (0) .QUIT.                                          *
*                                                                    *
*                                                                    *
*************************************************************************
Enter the required number :
```

Figur 7.3 Huvudmeny i Pendulo

Menyn liknar i stort den som tillämpas i LICWATER och i princip samma resultat kan erhållas. Menyvalen gås därför inte igenom.

7.4 Övriga datorprogram

Det finns idag för stationära beräkningar ett stort antal hydrauliska beräkningsprogram på marknaden. För dynamiska beräkningar är utbudet

mer begränsat.

Vilket program som används beror mycket på var man befinner sig i världen. I Skandinavien har traditionellt LICWATER varit mest populärt men i och med den enorma utvecklingen inom dataområdet kommer vi förmodligen att se fler program som används i framtiden.

Många av de programvaror som hittills använts är eller har varit DOS-baserade. I och med Windows-gränssnittet kommer många av de existerande programvarorna att utvecklas ytterligare och bli mer användarvänliga. Samtidigt kommer också många helt nya programvaror att utvecklas vilket också kommer att ha påverkan på priserna som kommer att pressas ner.

I grunden kommer dock flertalet av de hydrauliska programmen att erbjuda likartade möjligheter och i princip ge resultatframställningar liknande dem som beskrivs i föregående avsnitt och i tidigare delar av denna rapport.

Några hydrauliska beräkningsprogram som innehåller dynamiska moduler utöver LICWATER och PICCOLO är t.ex.

- Hypress, Tjeckiskt, (Hydroinform)
- FlowMaster, Engelskt (Flowmaster Int.)
- Cybernet, Amerikanskt (Heastad Methods)

8. LITTERATUR

8.1 Referenser

Jönsson, Lennart, 1993. VA-FORSK rapport nr 1993-02. Luft- och sedimentsamlingar i tryckledningar, inledande studie.

LICconsult A/S, 1996. Licwater manual, version 12/19, Birkeröd.

LICconsult A/S, 1993. Licwater Dynamisk manual, version 3.1/9, Birkeröd.

Meddelande, VAV M86, juni 1995. Svenska vatten- och avloppsföreningen, VAV. Regionala VAV-dagar i Trelleborg, Örnsköldsvik, Sunne och Eskilstuna. Föredrag vid VAV-dagarna den 17 mars, den 9-10 juni, den 22 september och den 20 oktober 1994.

VAV P38, 1979. Svenska vatten- och avloppsföreningen, VAV. Allmänna vattenledningsnät, Anvisningar för utformning och beräkning, Stockholm

VAV P58, 1988. Svenska vatten- och avloppsföreningen, VAV.
Tryckslag i VA-anläggningar, orsaker- beräkningsmetoder- skyddsåtgärder- mätningar

VBB Viak AB, 1995. Finspång vattennät, Hydraulisk analys.

VBB Viak AB, 1994. Falu vattennät, Tryckslagsberäkningar i vattennätet vid olika driftsituationer.

Rapporter utgivna i VA-FORSK-serien

1992-01 Hydraulisk analys av vattenledningsnät, *Lennart Andersson*
1992-02 Samverkan mellan avloppsnät och reningsverk, *Claes Hernebring*
1992-03 Lukt- och smakstörningar i dricksvatten, *Kjell Kihlberg, Roger Sävenhed*
1992-04 Artificial Groundwater Recharge – State of the Art, *Cristina Frycklund*
1992-05 Analysmetod för klordioxid, klorit och klorat, *Mats Lindgren, Einar Pontén*
1992-06 Undersökning av förfilter för järn- och manganreduktion vid dricksvattenrening, *Tibor Nemeth, Åke Elgemark*
1992-07 Inventering av datorbaserade system för övervakning och styrning inom kommunal teknik, *Bengt Zagerholm*
1992-08 Bräddning – Problemets omfattning i svenska tätorter, *Mats Andreason, Johan Larsson*
1992-09 Lokal dagvattenhantering — Erfarenheter från några anläggningar i drift, *Eva Jansson, Bo Lind, Björn Malbert*
1992-10 PRISEK Prioritering Samhällskonsekvenser Ekonomi – Ekonomisk modell och systematisk effektredovisning för värdering och prioritering av va-åtgärder, *Bertil Gustafsson, Gilbert Svensson*
1992-11 Konditionsstabilitet hos avloppsledningar av betong, *Viveka Lidström*
1992-12 Skadefall på nylagda betongledningar, *Ann-Christin Sundahl*
1992-13 Konstgjord grundvattenbildning, *Bertil Sundlöf, Lars Kronqvist*
1992-14 Trädrötter och ledningar, *Örjan Ståhl*
1992-15 Naturliga system för avloppsrening och resursutnyttjande i tempererat klimat, *HB Wittgren, Kenth Hasselgren*
1992-16 Vattenboken – En bok för mellanstadiet om vårt svenska vatten, *Accurat Information AB, VAV*
1992-17 Vattenboken – Lärarboken, *Accurat Information AB, VAV*
1992-18 Utvärdering av VA-FORSK, *Björn Svedinger*
1992-19 Hårdgöring av dricksvatten med krita-kolsyra – ett alternativ till kalk-kolsyra, *Dan Göthe, Bertil Israelsson*
1993-01 Alternativ va-teknik – Exempelsamling, *Per-Arne Malmqvist, Agneta Samuelsson*
1993-02 Luft- och sedimentansamlingar i tryckledningar – Inledande studie, *Lennart Jönsson*
1993-03 Algtoxiner i dricksvatten – en undersökning vid två svenska vattenverk samt litteraturstudie, *Heléne Annadotter*
1993-04 Simulering av hydrologin inom urbana områden. Metodikmanual – MouseNAM, *Lars-Göran Gustafsson*
1993-05 Användning av klordioxid — Reaktorstudier och halter i distributionssystemet vid nio vattenverk, *Mats Lindgren, Einar Pontén*
1993-06 Slamspridning på åkermark, *Per-Göran Andersson, Peter Nilsson*
1993-07 Analys av tillförselgrad till avloppsverk — svårigheter och möjligheter. Tillämpning på tillrinningen till Tivoliverket i Sundsvall, *Claes Hernebring*
1993-08 Indirekt nederbördspåverkan i spillvattensystem, *Hans Bäckman, Björn Marklund, Rune Olsson, Bengt-Lennart Peterson, Tore Wästlin*
1993-09 Franska va-driftentreprenader, *Lise-Lotte Nilsson*
1993-10 Generell kravspecifikation för styr- och övervakningssystem, *Bengt Zagerholm*
1993-11 Va på entreprenad, *Gösta Fredriksson, Bo Lannblad, Bengt Larsson, Åke Mattsson*
1993-12 Renovering av avloppsledningar. Riktlinjer för dokumentering och kvalitetskontroll, *Bjorn Borstad, Inge Faldager, Thomas Johansson*
1993-13 Simulering av vattenledningsnät med Piccolo — en utvärdering, *Krister Törneke*
1993-14 Drömmen om att allt ska förbli som det var — några reflexioner om konkurrens och strategeier för förändring inom va-branschen, *Lennart Hansson, Ola Mattisson*
1993-15 Kostnader för drift av avloppsreningsverk, *Peter Balmér, Bengt Mattsson*
1993-16 Rötkammares förmåga att bryta ned organiska föreningar i slam, *Hans Ring*
1994-01 Va-ledningars kondition, *Peter Stahre, Ann-Christin Sundahl, Viveka Lidström*
1994-02 Tillämpning av kvicksilverfri COD-analys inom va-tekniken, *Evy Axén, Gregory M Morrison*
1994-03 Drifterfarenheter med biologisk kvävereduktion, *Magnus Emanuelsson*
1994-04 Bestämning avv nitrat i kommunalt avloppsvatten — en metod lämpad för automatiserad övervakning och kontroll, *Christer Björklund, Bo Karlberg, Maikael Karlsson*
1994-05 Vattenförbrukningens dygnsvariation, *Lars Nikell*
1994-06 Dagvattnets sammansättning, recipientpåverkan och behandling, *Thomas Larm*
1994-07 Svavelväteproblem i avloppsledningar — praktiska drifterfarenheter och tillämpbara anvisningar, *Anders Ledskog, Sven-Gunnar Larsson, Bo Göran Lindqvist*
1994-08 Konstgjord grundvattenbildning — Processtudier vid inducerad infiltration och bassänginfiltration, *Cristina Frycklund, Gunnar Jacks, Per-Olof Johansson, Kerstin Lekander*
1994-09 Desinfektion/oxidation som förbehandling av ytvatten, *Mats Engdahl*
1994-10 Kontroll av bräddavlopp, *Bertil Forsberg*
1994-11 Dagvattnets sammansättning, *Per-Arne Malmqvist, Gilbert Svensson, Caroline Fjellström*
1994-12 Kortbedömning av TV-inspekterade avloppsledningar, *Olle Nilsson, Peter Stahre*
1994-13 Utjämningsmagasin. Erfarenheter i svenska avloppsnät, *Rolf Mansfeldt, Mats Andréasson, Bertil Svensson*
1994-14 MIKE SHE I Urban Miljö, Tillämpningsexempel Vittskövle, *Stefan Winberg, Lars-Göran Gustafsson, Lars Bengtsson*
1994-15 Avskiljare för lätta vätskor och fett, *Fred Nyberg*
1994-16 Datorstödd simulering av aktivslamprocessen – Försök vid 5 svenska reningsverk, *Jes la Cour Jansen, Dines Thornberg, Anders Finnson*
1995-01 Ringar på vattnet – VA-verken och Agenda 21, *Anna Helmrot, Gunnel Jonsson, Örjan Eriksson*
1995-02 Transport av föroreningar i avloppssystem. Beräkningsmöjligheter med MouseTRAP, *Clæs Hernebring, Cecilia Appelgren*
1995-03 Alternativa avloppssystem i Bergsjön och Hamburgsund. Delrapport från ECO-GUIDE-projektet, *Per-Arne Malmqvist, Hans Björkman, Majlis Stenberg, Ann-Carin Andersson, Anne-Marie Tillman, Erik Kärrman*
1995-04 Utvärdering av biologisk fosforavskiljning vid Öresundsverket i Helsingborg – Processtekniska och mikrobiologiska aspekter, *Magnus Christensson, Karin Jönsson, Natuschka Lee, Ewa Lie, Per Johansson, Thomas Welander, Kjetill Østgaard*
1995-05 Internkontroll vid VA-verk. Arbetsbok för upprättande och genomförande av internkontrollprogram för arbetsmiljön vid va-verk, *Ingvar Borgström, Anders Karlsson*
1995-06 Regional VA-samverkan – Potential och principer, *Lennart Hansson, Ola Mattisson*
1995-07 Hårdhetshöjning av dricksvatten med krita-kolsyra, ett alternativ till kalk-kolsyra – Fullskaleförsök vid Öxsjöverket Lerum, *Dan Göthe, Bertil Israelsson*
1995-08 Våtmarksrening vid Landsbro ARV, *Leif Lorentzon, Göran Nilsson, Yvonne Gunnevik, Carl Odelberg, Thomas Svensson*
1995-09 Tvättmedel – Effekter på reningsverk och miljö, *Cajsa Wahlberg*
1995-10 Utvärdering av VAVs läckagestatistik, *Ann-Christin Sundahl, Åse Hasselkvist*
1995-11 Trädrötter och avloppsledningar. En fördjupad undersökning av rotproblem i nya avloppsledningar, *Örjan Stål, Jörgen Rosenlöf*
1995-12 Renovering av vattenledningar. Riktlinjer för metodval, dimensionering och utförande, *Thomas Johansson, Per Romdal, Øistein Torgersen*
1995-13 Nya kemikalier – En utmaning för kommunala reningsverk. Förstudie, *Björn Frostell, Bengt Hultman, Jonas Röttorp, Peter Solyom*
1995-14 CD-ROM inom VA, *Leif W Linde, Gunnar Petersson*
1995-15 Kvalitetssäkerhet och leveranssäkerhet i distributionssystem för dricksvatten, *Bengt Zagerholm, Rolf Bergström*
1995-16 Försöksrapport från biologisk fosforavskiljning vid Jämshögs reningsverk, Olofströms kommun, *Carl-Johan Legetth*

Rapporter utgivna i VA-FORSK-serien

1996-01 Organiskt avfall som växtnäringsresurs. Potential och förslag till forsknings- och utvecklingsinsatser, *H B Wittgren*

1996-02 Rotinträngning i avloppsledningar. En undersökning av omfattning och kostnader i Sveriges kommuner, *Örjan Stål*

1996-03 Källsorterad humanurin i kretslopp – Förstudie i tre delar, *Håkan Jönsson, Anna Olsson, Thor Axel Stenström, Gunnel Dalhammar*

1996-04 VA sett på nytt sätt – Driftentreprenader i några kommuner, *Gösta Fredriksson, Bo Lannblad, Bengt Larsson, Åke Mattsson*

1996-05 Avrinningsområdesbaserade organisationer som aktiva planeringsaktörer, *Jan-Erik Gustafsson*

1996-06 Bedömningsgrunder för ovidkommande vatten i avloppsnät. Metodikmanual, *Ann-Marie Gustafsson, Gilbert Svensson*

1996-07 Snösmältningspåverkan på avloppssystem inom urbana områden, *Claes Hemebring*

1996-08 Rening av avloppsslam från tungmetaller och organiska miljöfarliga ämnen, *Erik Levlin, Lars Westlund, Bengt Hultman*

1996-09 Kemikaliers effekter i VA-sammanhang. En datasammanställning, *Ingemar Dellien*

1996-10 Syrgas i kombination med luftinblåsning vid pilotförsök med kväverening vid Västerås reningsverk, *Hermann Wiklund, Kjell-Ivar Dahlqvist, Bernt Ericsson*

1996-11 Export av svenskt kommunalt VA-kunnande, *Gösta W Fredriksson, Åke Mattsson*

1996-12 Litteraturdatabas för grundvatten i urban miljö på Internet, *Chester Svensson*

1996-13 Konkurrensutsättning av VA-verksamheten, *Stig Tunestål*

1997-01 Utvärdering av VA-lösningar i ekobyar, *J-E Haglund, B Olofsson*

1997-02 Aktivt stöd till fastighetsägare vid nybyggnad av VA-nät, *Roland Strandberg, Mårten Wärnö*

1997-03 Dosering av biokultur i en igensatt infiltrationsanläggning – En utvärdering, *Jenny Holmgren*

1997-04 Biogasanläggningar i Sverige, *Anna Lindberg*

1997-05 VA-försörjning i ny skepnad – Om konkurrens och strukturomvandling i Vaxholm, *Ola Mattisson*

1997-06 Fosforns växttillgänglighet i olika typer av slam, handelsgödsel samt aska, *Kersti Linderholm*

1997-07 Dricksvatten och korrosion – En handbok för vattenverken, *Bo Berghult, Ann Elfström Broo, Torsten Hedberg*

1997-08 Alternativa avloppssystem i Bergsjön och Hamburgsund. Sammanfattande slutrapport från ECO-GUIDE-projektet, *Per-Arne Malmqvist, Majlis Stenberg*

1997-09 Analys av avloppssystem med datormodeller. Tillämpningsexempel med MOUSE-systemet, *Bo Granlund, Mats Andréasson*

1997-10 Läcksökning med hjälp av tryckslagsmätningar – Transientmetoden, *Lennart Jönsson, Anders Svensson*

1997-11 Modellering av ekologisk dagvattenhantering, *Cecilia Wennberg*

1997-12 Avvattning av avloppsslam med naturnära metoder – Erfarenheter från ett fullskaleförsök i Lövånger, *Daniel Hellström, Elisabeth Kvarnström*

1997-13 Sambandet mellan kostnader och avgifter inom kommunal VA-verksamhet, *Torbjörn Tagesson*

1997-14 Kundorienterad kvalitetsutveckling i VA-verksamhet – Rapport från en förstudie, *Patrik Larsson, Saara Isaksson*

1997-15 Läck- och dräneringsvatten i spillvattensystem, *Hans Bäckman, Bengt Göran Hellström, Anders Jaryd, Åke Jonsson*

1997-16 Avvattningslaguner för slam från enskilda brunnar, *Erik Brydolf, Eric Rönnols*

1998-01 Tryckslag i vattenledningsnät – några exempel, *Johan Spännare*