

Trykkstøtberegninger i VA-ledninger ved hjelp av bordregnemaskin

Av Jonas Moe

Jonas Moe er siviling. fra M.I.T. i USA. Han er seniorforsker ved Rogalandforskning.

I. INNLEDNING

Moderne bordregnemaskiner (desktop computers) har i dag en regnekapasitet som kan sammenlignes med kapasiteten til mange større datamaskiner av litt eldre årgang. (Mikromaskin er et annet navn på bordregnemaskin; betegnelsen «mikro» henspiller bare de fysiske dimensjoner på utstyret.)

I løpet av de nærmeste årene vil denne type dataanlegg finne et stadig større marked hos rådgivende ingeniørfirma. En markedsanalyse blant en del konsulentfirma innen VA-teknikk viste at det var et stort behov for et effektivt og brukertrett EDB-program for beregning av trykkstøt på bordregnemaskin.

II. OM PROGRAMMET WATHAM, EGENSKAPER, MULIGHETER OG BEGRENSNINGER

Med støtte fra Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd (NTNF) satte VHL seg som mål, høsten 1978, å framskaffe et EDB-program som skulle dekke en større del av beregningsbehovet for trykkstøt i vann- og avløpsanlegg.

Man fant at et slikt program minst måtte inneholde følgende 5 beregningsopsjoner:

- 1) Pumpeutfall med pumpen plassert i sumpen.
- 2) Pumpeutfall med pumpen plassert på ledningen.
- 3) Pumpeutfall med ulike trykkstøtdempende tiltak på ledningen, enkeltvis eller i kombinasjon, så som:
 - a) omløp,
 - b) en-veis svingbasseng,
 - c) vindkjel.
- 4) Ventillukking i selvfallsledning.
- 5) Ventillukking i selvfallsledning med sikkerhetsventil.

En helt overordnet målsetting med prosjektet var at programmet skulle være mest mulig brukervennlig. Brukervennlighet til et EBB-program må alltid fastlegges ut fra brukerens spesielle forutsetninger. Brukeren av WATHAM vil typisk være en VA-ingeniør som hverken kan forsettes å være spesielt EDB-kyndig eller ekspert på beregning av trykkstøt. Ut fra dette innså man snart at den høye grad av brukervennlighet som man la opp til bare lot seg realisere ved å gjøre programmet interaktivt.

Karakteristisk for interaktive program er at det opprettes en slags «dialog» mellom brukeren av programmet på den ene siden og datamaskinen på den annen. Dialogen foregår på den måten at brukeren sitter ved en dataskjerm og besvarer spørsmål om det problem som skal regnes. Dialogen kan skje såvel under

innlesing som under selve kjøringen. Fordi alle data lagres i maskinen, behøver en ikke taste inn alle inngangsdata på nytt fra en beregning til den neste. Det er derfor lett å korrigere for feil i data eller å beregne samme problem om igjen for mindre forandringer i spesifikasjonene. De fleste spørsmålene fra WATHAM dreier seg om tekniske spesifikasjoner som rørlengde, diameter, tregheitsmoment etc. Utvelgelsen av programmodulen for det anlegget som skal beregnes, 5 i alt, skjer på grunnlag av ja/nei-type spørsmål. Alle spørsmål som kommer på skjermen, er på engelsk. Flytskjemaet på neste side gir en forenklet oversikt over hvorledes beregningsgangen er strukturert i WATHAM.

Inngangsdata til WATHAM er organisert i 2 grupper, en som er felles for alle problemtyper, og en som er problemavhengig. Med problemavhengige data tenker en her på data for de aktuelle trykkstøtdempende tiltak.

Følgende 4 grupper av inngangsdata til programmet er felles:

- 1) Generelle spesifikasjoner som vann-temperatur og parametre for styring av beregningsgangen.
- 2) Rørsesifikasjoner (lengde, diameter osv.).
- 3) Pumpe- eller ventilkarakteristikker.
- 4) Kotehøyder for ledningstraceen.

Eksempel på problemavhengig inngangsdata vil framgå av beregningseksemplet i kapittel III.

Utskrift fra WATHAM kan grovt inndeles som følger:

- 1) Repetisjon av innleste data.
- 2) Resultat av stasjonærberegningen.
- 3) Resultat av integrasjon av trykkstøtligningene i form av tabeller som viser

trykk og vannhastighet som funksjon av tid og sted. Brukeren kontrollerer selv utskriftsmengden ved å angi antall tidskritt mellom hver utskrift.

- 4) En tabell over ekstremaltrykk (maksima og minima) langs hele ledningen.

Alle tabeller inneholder trykk og piezometertrykk i meter vannsøyle, mVs.

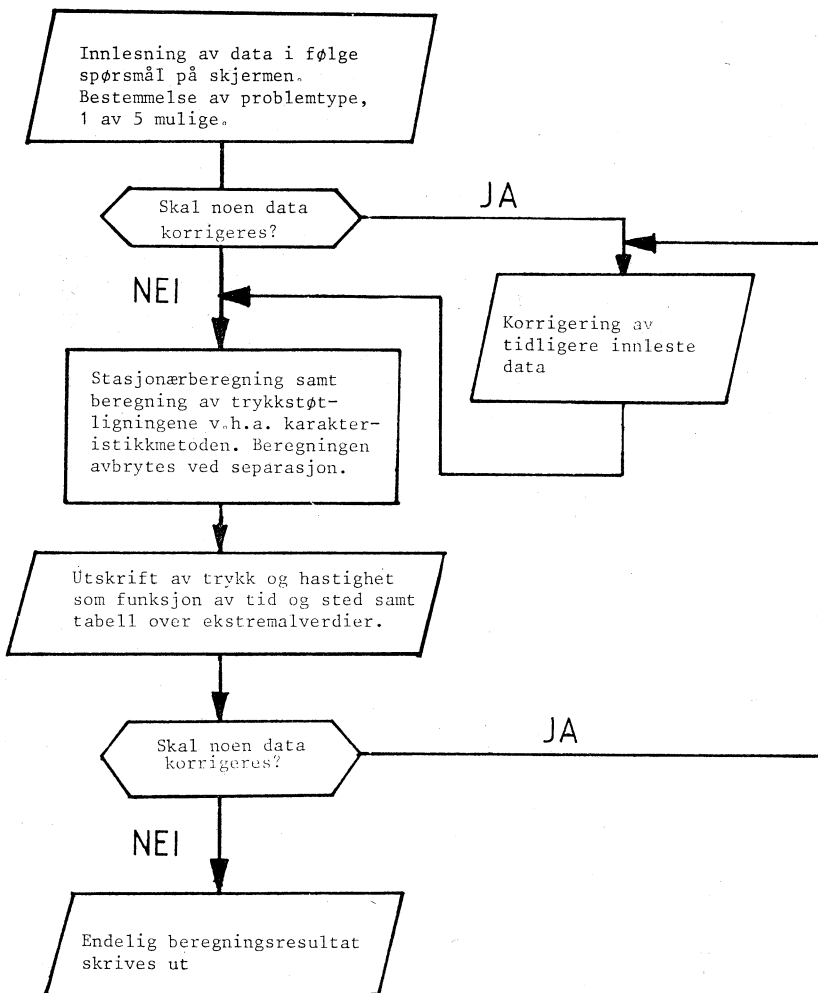
Fordelene ved at WATHAM er interaktivt, kan, som nevnt, kort oppsummeres slik:

- 1) Brukeren behøver ikke være noen EDB-ekspert, og trenger ikke bruke tid på å studere brukermanualen hver gang programmet skal kjøres. Brukermanual for WATHAM er strengt tatt ikke nødvendig!
- 2) Brukeren må naturligvis kunne vurdere beregningsresultatet, men behøver ikke være noen trykkstøt-ekspert, bl.a. fordi programmet stiller spørsmål om de data som er nødvendig for å løse det aktuelle problem.

Dette siste punkt anser vi for å være av stor betydning, fordi det erfaringsmessig har vist seg at mange ofte er usikre på hvilke data som er nødvendige for å gjennomføre en trykkstøtberegning.

Om man ved utviklingen av WATHAM la stor vekt på brukervennlighet, så var det imidlertid også et annet aspekt ved gjennomføringen av prosjektet som ble prioritert vel så høyt: Programmet skulle være så lett tilgjengelig for brukeren som overhodet mulig.

Med henvisning til det som er nevnt i innledningskapitlet om den stadig økende utbredelse av bordregnemaskiner hos konsulentene innen VA-teknikk, så var det naturlig å ta konsekvensen av dette og legge programmet til rette for kjøring på bordregnemaskiner.



Flytskjemaet viser beregningsgangen i WATHAM.

Beslutningen om at programmet skulle kunne kjøres på bordregnemaskiner medførte imidlertid to alvorlige, og ikke minst, fordyrende, restriksjoner:

1) Programmets størrelse måtte begrenses til 32k ord.

2) Programmet måtte skrives i et språk som gjorde det lett å konvertere til andre bordregnemaskiner. Siden bare noen ganske få typer bordregnemaskiner er utstyrt med FORTRAN-komplikator, måtte programmet skrives i BASIC.

Ved utviklingen av WATHAM har vi i stor utstrekning benyttet ferdig uttestede programmoduler, slik disse er dokumentert i trykkstøtlitteraturen. Vi har spesielt benyttet, og kan anbefale, ref. 1. Programeksempler tilsvarende de i ref. 1 kan også finnes i ref. 2 og 3, se litteraturlisten bak.

Den nevnte restriksjon i programstørrelsen på 32k ord, og ikke minst prosjektets økonomi, medførte at WATHAM pr. i dag bare kan benyttes ved beregning av trykkstøt i enkle rørledninger. Videre kan det bare beregne pumpeutfall i første kvadrant, dvs. med tilbakeslagsventil. (De fleste pumpeanlegg i VA-teknikken er utstyrt med tilbakeslagsventil).

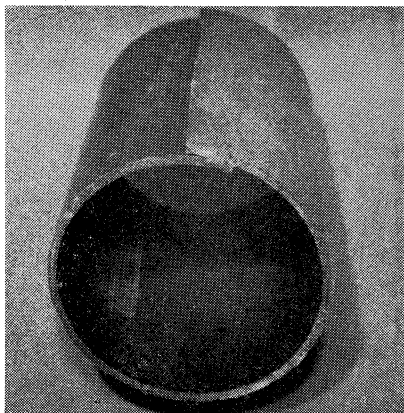
Nedenfor har vi listet opp en del aktuelle programutvidelser av WATHAM. Noen av disse er planlagt iverksatt fra høsten 1981; alt etter behov:

- beregning av rørforgreninger,
- pumpeutfall uten tilbakeslagsventil, (dvs. i alle 4 kvadranter)
- selektivt pumpeutfall og pumpestart,
- separasjon,
- luftinnslipningsventil.

III. EKSEMPEL PÅ TRYKKSTØTBEREGNING MED WATHAM

1. Bakgrunn

Som eksempel på bruk av WATHAM, skal vi her beregne trykkstøt i en 1040 m lang PVC pumpeledning for avløpsvann. Man hadde registrert 7 brudd på ledningen i løpet av forholdsvis kort tid. Det var klarlagt at noen av bruddene var oppstått i forbindelse med strømbrudd.



Fotografiet viser et utsnitt av pumpeledningen etter brudd.

Bruddet tok form av en langsgående, nesten snorrett sprekk i hele rørlengden på 6 m. Røret hadde trykkklasse 6 (PN6) med utvendig diameter 280 mm, og godstykkelse 8,2 mm. Pumpestasjonen består av 2 pumper i serie med tidsforsinkelse ved start og stopp av pumpene. Tidsreleene hadde imidlertid ikke funksjonert som forutsatt, slik at pumpene sannsynligvis hadde falt ut samtidig. I tillegg til en beregning av det eksisterende anlegg, var laboratoriet anmodet om å foreslå tiltak med sikte på å forebygge skadelige trykkstøt i anlegget.

2. Beskrivelse av anlegget

Pumpeledningen består av 2 parallelle 280 mm PVC ledninger. Ledningstraceene ble modellert som på fig. 1a. Bruddstedene er også markert på fig. 1a. Pumpestasjonen har 2 sett seriekoplete pumper, der hvert sett (ca. 2 pumper), har sin pumpeledning. En tilbakeslagsventil er plassert mellom pumpene. Ved pumpestopp vil

ledningen være fylt med vann. I enden av pumpeledningene går disse over i en selvfølgelig via en kum. Det var ikke montert lufteventiler på pumpeledningene.

i 5 rette rørstrekkninger, mest mulig tilpasset den virkelige traceen.

Inngangsdata blir skrevet ut først i utskriften, sammen med resultatet av stasjonærberegningen, i denne rekkefølge:

3. Inngangsdata til WATHAM

I beregningsseksemplet i det følgende er pumpeledningen som nevnt modellert som vist i fig. 1a. Ledningen er delt opp

- Generelle data (tabell 1).
- Pumpedata (tabell 2).
- Rørdata (tabell 3).

```

*****
*                                     *
*   SOURCE PUMP FAILURE             *
*                                     *
*****

```

```

*****
*   GENERAL INPUT                   *
*****

```

```

NUMBER OF PIPES                5
MIN. NO. OF PARTS INTO WHICH PIPE IS DIV.  3
RESERVOIR ELEVATION AT DOWNSTREAM END      35.0 M
WATER TEMPERATURE                10.0 C
ELEV. OF DOWNSTREAM END OF LAST PIPE      35.0 M
MAXIMUM REAL TIME OF SIMULATION          60.0 S
ACC. OF ITER. FOR STEADY STATE DISCH.    0.03000 L/S

```

OUTPUT IS PRINTED EVERY 10 TH TIME INTERVAL

Tabell 1. Utskrift av generelle data ved pumpeutfall.

4. Beregningsresultater fra WATHAM

Beregningsresultatet er skrevet ut i tabell 4, se side 8 og 9.

x = oppdelingspunktet på røret
($x = 0,5$ betyr midt på røret)

HEAD-m = trykket i røret (i mVs)

H-m = piezometerhøyden (i mVs)

V-m/s = vannhastigheten i m/s

Beregningen viser at separasjon inntreffer etter 3,05 sek i rør 4, nærmere bestemt i 2/3-punktet regnet fra oppstrøms ende av røret, se side 290. Dette er i god overensstemmelse med lokaliseringen av et registrert brudd i denne del av ledningen, se fig. 1a.

Beregningen viser videre et undertrykk på 8 m i rør 2, der en fra før hadde registrert i alt 5 brudd!

 * PUMP DATA *

NUMBER OF PUMPS IN PARALLELL 1
 NUMBER OF STAGES OF EACH PUMP 2
 STEADY STATE PUMP SPEED 1460.0 RPM
 EACH PUMP AND MOTOR UNIT HAS A
 MOMENT OF INERTIA 0.7 KG M²
 ELEVATION OF WATER SURFACE IN SUMP 2.6 M

FROM PUMP CHARACTERISTIC CURVE:

DISCHARGE (L/S)	HEAD/STAGE (M)	POWER (KW)
0.00	42.00	22.00
20.00	37.00	23.00
40.00	33.00	25.00
60.00	28.00	29.00
100.00	17.00	33.00
130.00	0.00	35.00

Tabell 2. Utskrift av pumpedata.

 * PIPE DATA *

PIPE 1 DIAMETER 0.264 M
 LENGTH 195.000 M
 ROUGHNESS 0.050 MM
 PIPE WALL THICKNESS 0.0082 M
 MODULI OF ELASTICITY
 FOR THE PIPE 3.000E+09 N/M²
 UPSTR. PIPE ELEV. 4.5 M

COMPUTED VALUES:
 WAVE SPEED 298.5 M/S
 F (DARCY-WEISBACH) 0.01284
 STEADY STATE VELOC. 1.646 M/S
 DELTAT 0.217 S
 SINE(THETA) 0.01282
 L/A 0.653 S
 DIVIDED INTO 4 PARTS

Tabell 3. Utskrift av rørddata (forts.)

Pipe 2

DIAMETER	0.264	M
LENGTH	380.000	M
ROUGHNESS	0.050	MM
PIPE WALL THICKNESS	0.0082	M
MODULI OF ELASTICITY FOR THE PIPE	3.000E+09	N/M2
UPSTR. PIPE ELEV.	7.0	M

COMPUTED VALUES:		
WAVE SPEED	298.5	M/S
F (DARCY-WEISBACH)	0.01284	
STEADY STATE VELOC.	1.646	M/S
DELTAT	0.422	S
SINE(THETA)	0.00526	
L/A	1.273	S
DIVIDED INTO	9	PARTS

Pipe 3

DIAMETER	0.264	M
LENGTH	180.000	M
ROUGHNESS	0.050	MM
PIPE WALL THICKNESS	0.0082	M
MODULI OF ELASTICITY FOR THE PIPE	3.000E+09	N/M2
UPSTR. PIPE ELEV.	9.0	M

COMPUTED VALUES:		
WAVE SPEED	298.5	M/S
F (DARCY-WEISBACH)	0.01284	
STEADY STATE VELOC.	1.646	M/S
DELTAT	0.200	S
SINE(THETA)	-0.00556	
L/A	0.603	S
DIVIDED INTO	4	PARTS

Pipe 4

DIAMETER	0.264	M
LENGTH	125.000	M
ROUGHNESS	0.050	MM
PIPE WALL THICKNESS	0.0082	M
MODULI OF ELASTICITY FOR THE PIPE	3.000E+09	N/M2
UPSTR. PIPE ELEV.	8.0	M

COMPUTED VALUES:		
WAVE SPEED	298.5	M/S
F (DARCY-WEISBACH)	0.01284	
STEADY STATE VELOC.	1.646	M/S
DELTAT	0.139	S
SINE(THETA)	0.16000	
L/A	0.419	S
DIVIDED INTO	3	PARTS

Pipe 5

DIAMETER	0.264	M
LENGTH	160.000	M
ROUGHNESS	0.050	MM
PIPE WALL THICKNESS	0.0082	M
MODULI OF ELASTICITY FOR THE PIPE	3.000E+09	N/M2
UPSTR. PIPE ELEV.	28.0	M

COMPUTED VALUES:		
WAVE SPEED	298.5	M/S
F (DARCY-WEISBACH)	0.01284	
STEADY STATE VELOC.	1.646	M/S
DELTAT	0.178	S
SINE(THETA)	0.04375	
L/A	0.536	S
DIVIDED INTO	3	PARTS

KINEMATIC VISCOSITY IS 0.0000013 M2/S

Tabell 3. Utskrift av rørdاتا

Trykkbølgen som forårsaker separasjon, er tegnet opp i fig. 1b. Ved separasjon avbrytes beregningen, og programmet skriver ut ekstremaltrykkene inntil det tidspunkt da separasjon finner sted.

Om den sannsynlige årsak til bruddene bemerkes at et undetrykk på 8—10 mVs kan føre til at ledningen klapper sammen, særlig hvis røret fra før er deformert (ovalt) på grunn av utilfredsstillende komprimering. Ved separasjon og en påfølgende

de sammenklapping av væskestrengen, vil det lett kunne oppstå trykkstøt som langt overstiger trykkklassen for røret.

Det er trolig en kombinasjon av disse to forhold, gjentagne sammenklappinger av røret etterfulgt av høye innvendige overtrykk i det øyeblikk væskestrengen igjen støter sammen, som har ført til bruddene. Det her nevnte årsaksforhold kan også gjøres gjeldende som en forklaring på de 5 bruddene i rør 2, fordi

PRESSURE HEADS, H-VALUES AND VELOC. AS FUNCTIONS OF TIME

----- TIME = 0.000 S -----

	X	HEAD-M	H-M	V-M/S	X	HEAD-M	H-M	V-M/S
PIPE 1	0.000	37.	42.	1.65	0.250	37.	42.	1.65
	0.500	36.	41.	1.65	0.750	35.	41.	1.65
	1.000	34.	41.	1.65				
PIPE 2	0.000	34.	41.	1.65	0.111	33.	40.	1.65
	0.222	33.	40.	1.65	0.333	32.	40.	1.65
	0.444	32.	40.	1.65	0.556	31.	39.	1.65
	0.667	31.	39.	1.65	0.778	30.	39.	1.65
	0.889	30.	38.	1.65	1.000	29.	38.	1.65
PIPE 3	0.000	29.	38.	1.65	0.250	29.	38.	1.65
	0.500	29.	38.	1.65	0.750	29.	37.	1.65
	1.000	29.	37.	1.65				
PIPE 4	0.000	29.	37.	1.65	0.333	22.	37.	1.65
	0.667	15.	36.	1.65	1.000	8.	36.	1.65
PIPE 5	0.000	8.	36.	1.65	0.333	5.	36.	1.65
	0.667	3.	35.	1.65	1.000	-0.	35.	1.65

PUMP SPEED = 1460.0 RPM

PUMP DISCHARGE = 90.2 L/S EACH

----- TIME = 1.388 S -----

	X	HEAD-M	H-M	V-M/S	X	HEAD-M	H-M	V-M/S
PIPE 1	0.000	-2.	3.	0.39	0.250	-3.	2.	0.39
	0.500	-3.	2.	0.39	0.750	-4.	2.	0.40
	1.000	-4.	3.	0.42				
PIPE 2	0.000	-4.	3.	0.42	0.111	-3.	4.	0.45
	0.222	-2.	5.	0.50	0.333	0.	8.	0.60
	0.444	6.	14.	0.81	0.556	18.	26.	1.20
	0.667	31.	39.	1.64	0.778	30.	39.	1.64
	0.889	30.	38.	1.64	1.000	29.	38.	1.64
PIPE 3	0.000	29.	38.	1.64	0.250	29.	38.	1.64
	0.500	29.	38.	1.64	0.750	29.	37.	1.64
	1.000	29.	37.	1.64				
PIPE 4	0.000	29.	37.	1.64	0.333	22.	37.	1.64
	0.667	15.	36.	1.65	1.000	8.	36.	1.65
PIPE 5	0.000	8.	36.	1.65	0.333	5.	36.	1.65
	0.667	3.	35.	1.65	1.000	0.	35.	1.65

Tabell 4. Trykk og hastighet som funksjon av tid og sted. (forts.)

----- TIME = 2.777 S -----

	X	HEAD-M	H-M	V-M/S	X	HEAD-M	H-M	V-M/S
PIPE 1	0.000	-2.	3.	0.43	0.250	-3.	2.	0.43
	0.500	-3.	2.	0.43	0.750	-4.	2.	0.43
	1.000	-5.	2.	0.43				
PIPE 2	0.000	-5.	2.	0.43	0.111	-5.	2.	0.43
	0.222	-6.	2.	0.43	0.333	-6.	2.	0.43
	0.444	-7.	1.	0.43	0.556	-7.	1.	0.43
	0.667	-7.	1.	0.43	0.778	-8.	1.	0.43
	0.889	-8.	1.	0.44	1.000	-8.	1.	0.45
PIPE 3	0.000	-8.	1.	0.45	0.250	-7.	2.	0.47
	0.500	-6.	3.	0.51	0.750	-3.	5.	0.59
	1.000	2.	10.	0.75				
PIPE 4	0.000	2.	10.	0.75	0.333	3.	17.	1.01
	0.667	6.	28.	1.37	1.000	8.	36.	1.65
PIPE 5	0.000	8.	36.	1.65	0.333	5.	36.	1.65
	0.667	3.	35.	1.65	1.000	0.	35.	1.65

COLUMN SEPARATION HAS OCCURRED
 TIME= 3.05 S, PIPE= 4, LOCATION= 0.667

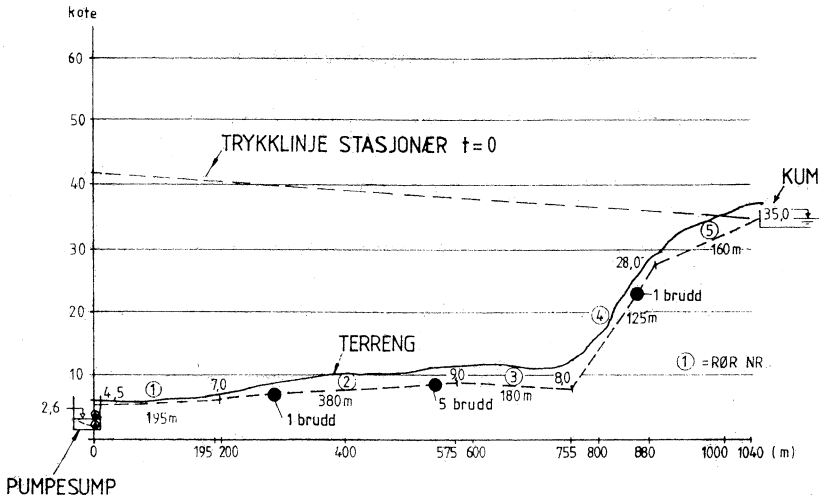
COLUMN SEPARATION HAS OCCURRED
 TIME= 3.05 S, PIPE= 4, LOCATION= 1.000

COLUMN SEPARATION HAS OCCURRED
 TIME= 3.05 S, PIPE= 5, LOCATION= 0.000

----- TIME = 3.054 S -----

	X	HEAD-M	H-M	V-M/S	X	HEAD-M	H-M	V-M/S
PIPE 1	0.000	-2.	3.	0.43	0.250	-3.	2.	0.44
	0.500	-3.	2.	0.44	0.750	-4.	2.	0.44
	1.000	-5.	2.	0.44				
PIPE 2	0.000	-5.	2.	0.44	0.111	-5.	2.	0.44
	0.222	-6.	2.	0.44	0.333	-6.	1.	0.44
	0.444	-7.	1.	0.44	0.556	-7.	1.	0.44
	0.667	-7.	1.	0.44	0.778	-8.	1.	0.44
	0.889	-8.	1.	0.44	1.000	-8.	1.	0.44
PIPE 3	0.000	-8.	1.	0.44	0.250	-8.	1.	0.45
	0.500	-8.	1.	0.46	0.750	-7.	2.	0.49
	1.000	-5.	3.	0.54				
PIPE 4	0.000	-5.	3.	0.54	0.333	-10.	5.	0.61
	0.667	-12.	9.	0.76	1.000	-11.	17.	1.02
PIPE 5	0.000	-11.	17.	1.02	0.333	-1.	29.	1.43
	0.667	3.	35.	1.65	1.000	0.	35.	1.65

Tabell 4. Trykk og hastighet som funksjon av tid og sted.



Figur 1a Pumpeledningen modellert for beregning med WATHAM med trykklinjene for stasjonærsituasjonen inntegnet. Bruddstedene er også avmerket på figuren.

væskestrengen også vil kunne separere for undertrykk på 8 mVS, dersom vannet inneholder oppløst luft eller gass. Dette siste er ofte tilfelle for avløpsvann.

Før en bestemte seg for å anbefale anlegget utstyrt med vindkjel, prøvet en diverse alternative trykkstøtdempende tiltak, blant annet omløp ved pumpen. Disse beregninger er ikke tatt med i dette beregningseksemplet, av plasshensyn. (Bruk av omløp ga i dette tilfelle ubetydelig trykkstøtdempende virkning, som

jo forutsetter at $\frac{a \cdot V_0}{g \cdot H_0} \gg 1$, ref. 4.)

Pumpeutfall med vindkjel montert på pumpens trykkside ga positivt trykk langs hele ledningen for et opprinnelig luft-

volum i kjelen på 0,5 m³. Maksimaltrykket ved pumpen ble 56,1 mVS, dvs. innenfor det trykklassen foreskriver, se tabell 6.

Ekstremaltrykkene, med vindkjelen montert, er vist i fig. 1b. Kjelen største luftvolum ble beregnet til 0,989 m³, 10,1 sek etter at pumpen var falt ut.

Anbefalt totalvolum på vindkjelen, med en sikkerhetsmargin på 25% i henhold til vanlig dimensjoneringspraksis, blir følgelig 1,25 m³.

Beregning med en standar produsert vindkjel (membrankar), med en tilslutningsdiameter på 0,075 m, viste at undertrykket i rør 5 blir 6,2 mVS uansett hvor stort en gjør kjelevolumet. Dette alternativ var derfor ikke akseptabelt.

 * TABLE OF EXTREME VALUES *

	X	MAX HEAD	MIN HEAD	MAX H	MIN H
PIPE 1					
	0.000	37.	-2.	42.	3.
	0.250	37.	-3.	42.	2.
	0.500	36.	-3.	41.	2.
	0.750	35.	-4.	41.	2.
	1.000	34.	-5.	41.	2.
PIPE 2					
	0.000	34.	-5.	41.	2.
	0.111	33.	-5.	40.	2.
	0.222	33.	-6.	40.	2.
	0.333	32.	-6.	40.	1.
	0.444	32.	-7.	40.	1.
	0.556	31.	-7.	39.	1.
	0.667	31.	-7.	39.	1.
	0.778	30.	-8.	39.	1.
	0.889	30.	-8.	38.	1.
	1.000	29.	-8.	38.	1.
PIPE 3					
	0.000	29.	-8.	38.	1.
	0.250	29.	-8.	38.	1.
	0.500	29.	-8.	38.	1.
	0.750	29.	-7.	37.	2.
	1.000	29.	-5.	37.	3.
PIPE 4					
	0.000	29.	-5.	37.	3.
	0.333	22.	-10.	37.	5.
	0.667	15.	-12.	36.	9.
	1.000	8.	-11.	36.	17.
PIPE 5					
	0.000	8.	-11.	36.	17.
	0.333	5.	-1.	36.	29.
	0.667	3.	3.	35.	35.
	1.000	0.	-0.	35.	35.

MAXIMUM HEAD = 37.5 M IN PIPE 1, X = 0.000, TIME = 0.00 S

MINIMUM HEAD = -12.0 M IN PIPE 4, X = 0.667, TIME = 3.05 S

Tabell 5. Utskriften viser ekstremaltrykkene langs pumpeledningen.

* AIR CHAMBER DATA *

INITIAL AIR CHAMBER VOLUME	0.500 M3
DISCH. COEFF. FOR OUTFLOW	0.900
DISCH. COEFF. FOR INFLOW	0.500
CHAMBER NOZZLE DIAMETER	0.150 M
POLYTROPIC EXPONENT	1.20

* TABLE OF EXTREME VALUES *

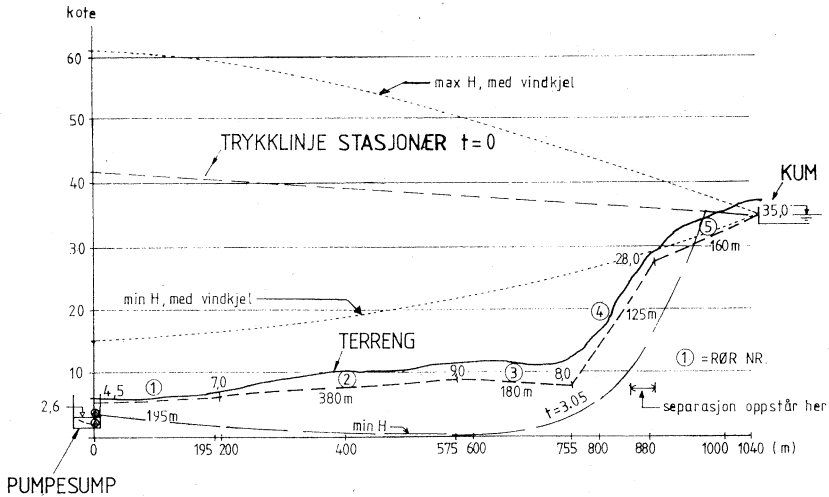
	X	MAX HEAD	MIN HEAD	MAX H	MIN H
	-----	-----	-----	-----	-----
PIPE 1	0.000	56.	11.	61.	15.
	0.250	55.	11.	60.	16.
	0.500	54.	11.	60.	16.
	0.750	53.	10.	59.	17.
	1.000	52.	10.	59.	17.
PIPE 2	0.000	52.	10.	59.	17.
	0.111	51.	10.	58.	18.
	0.222	50.	10.	57.	18.
	0.333	49.	11.	57.	18.
	0.444	48.	11.	56.	19.
	0.556	47.	11.	55.	19.
	0.667	46.	11.	54.	20.
	0.778	44.	12.	53.	20.
	0.889	43.	12.	52.	21.
	1.000	42.	13.	51.	22.
PIPE 3	0.000	42.	13.	51.	22.
	0.250	40.	14.	49.	23.
	0.500	39.	15.	48.	23.
	0.750	38.	16.	46.	24.
	1.000	37.	18.	45.	26.
PIPE 4	0.000	37.	18.	45.	26.
	0.333	29.	12.	44.	27.
	0.667	21.	7.	42.	28.
	1.000	13.	1.	41.	29.
PIPE 5	0.000	13.	1.	41.	29.
	0.333	8.	1.	39.	31.
	0.667	4.	0.	37.	33.
	1.000	0.	-0.	35.	35.

MAXIMUM HEAD = 56.1 M IN PIPE 1, X = 0.000, TIME = 28.46 S

MINIMUM HEAD = -0.0 M IN PIPE 5, X = 1.000, TIME = 0.00 S

MAXIMUM AIR VOLUME 0.989 M3 AT TIME 10.1 S

Tabell6. Utskrift av vindkjeldata samt ekstremalverdier for trykkene.



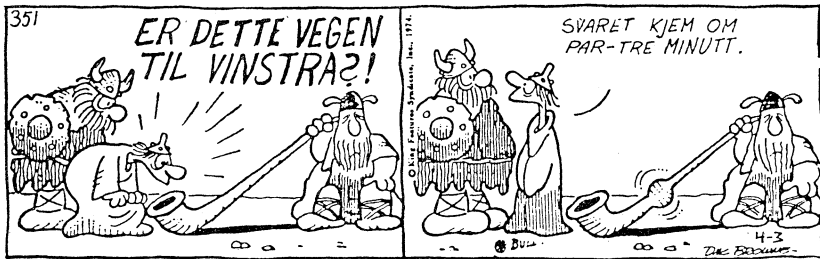
Figur 1b Pumpeutfall i eksisterende anlegg gir separasjon i rør 4 etter 3,05 sek. Pumpeutfall med vindkjel montert ved pumpen gir positivt trykk langs hele ledningen.

IV. AVSLUTNING

Trykkstøt i rørsystem er ikke uten videre lett å forstå, eller for den sakens skyld, å beregne. Dette er nok årsaken til at trykkstøt, som strømningsfenomen, ofte er omgitt av så meget usikkerhet, og kan hende også av mystikk. Tatt i betraktning de økonomiske konsekvenser, i form av havari, som en neglisjering, eller mangelfull utredning av mulige trykkstøtskader kan forårsake i et anlegg, konferer

vårt lille beregningseksempel, så burde dette emnet være viet større oppmerksomhet i undervisningen i hydraulikk ved våre tekniske skoler.

Det er et klart behov for øket kompetanse i beregning av trykkstøt blant rådgivende ingeniører. Det er vårt håp at WATHAM i fremtiden kan bli allmannsøie, og derved bidra til en slik kompetanseoppbygging.



Eksempel på trykkstøt i et særdeles enkelt rørsystem.

REFERANSER

- /1/ *Watters, Gary Z.*, 1979: «Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines». Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor, Michigan.
- /2/ *Streeter, V., and Wylie, E. B.*, 1978: «Fluid Transients», McGraw-Hill Book Co.
- /3/ *Chaudhry, M. Hanif*, 1979: «Applied Hydraulic Transients». Van Nostrand Co., New York.
- /4/ *Thorley, A. R. D., and Enever, K. J.*, 1979: «Control and Suppression of Pressure Surges in Pipelines and Tunnels». CIRIA Report 84.
- /5/ «Profilnytt». Desember 1979. SINTEF avd. 71, 7034 Trondheim — NTH.
- /6/ «RUN. NYTT. November 1979. RUNIT 7034 Trondheim — NTH.