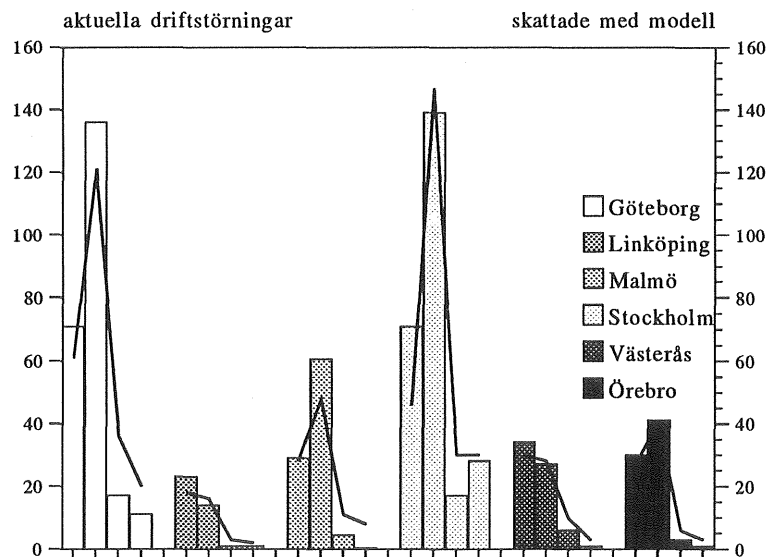


Modellering av felintensiteten på vattenledningar i sex svenska städer

Modelling Water Pipe Break Rates in Six Swedish Municipalities



Teresia Rd Wengström

Institutionen för
vattenförsörjnings- och avloppsteknik

Adress:

Institutionen för VA-teknik
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg

ISSN 0280-4035

Nyckelord: funktionssäkerhet, ledningar, vatten, felintensitet, driftstörningar, distributionsnät

Modellering av felintensiteten på vattenledningar i sex svenska städer

Modelling Water Pipe Break Rates in Six Swedish Municipalities

Teresia Rd Wengström

Förord

Detta arbete utgör för mig en del av kursen Matematisk modellering. Arbetet är också en del i licentiatarbetet om funktionssäkerhet för va-ledningar. En förstudie av licentiatarbetet finns publicerad, "Kartläggning av segjärnsledningar i Göteborg - 1977-87", Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 88, Chalmers Tekniska Högskola.

Problemställningen för detta arbete har varit att försöka använda något av den information som finns lagrad om driftstörningar på vattenledningar. Undersökningen har inriktat sig på faktorerna ledningsdiameter, ledningslängd och antal skador. De två sistnämnda används ofta för att beskriva felintensiteten. Vid modellbyggandet har jag fått hjälp av Johan Karlsson på matematiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg.

Jag vill även tacka min handledare Gilbert Svensson för den uppmuntran och det stöd han visat.

Göteborg i februari 1992

Teresia Rd. Wengström

Sammanfattning

Arbetet syftar till att undersöka ett samband mellan ledningars längd och deras felbenägenhet. Utgångspunkten var ett samband visat av Andreou (1986) att felbenägenheten för en ledning skulle kunna uppskattas vara proportionell mot roten ur dess ledningslängd.

Modellen applicerades på ett uppskattat antal ledningar i fyra dimensionsgrupper för Stockholm, Göteborg, Malmö, Västerås, Linköping och Örebro. I modellen användes uppgifter om varje stads totala längd vattenledningar, oberoende av material, för fyra dimensionsgrupper, 19-110 mm, 125-200 mm, 225-400 mm och >400 mm. En antagen medellängd i meter för varje dimensionsgrupp, beräknad ur material från Örebro, användes vid skattningen av antalet ledningar.

Arbetet visade att det av Andreou antagna sambandet skulle kunna gälla, men att andra samband också är troliga. En bidragande orsak till detta är förmodligen den lilla spännvidden i skattade medellängder. För fortsatta försök skulle noggrannare uppgifter om ledningslängder och deras variation inom olika dimensionsgrupper behöva fastställas om modellantagandet ska kunna undersökas utförligare.

Summary

The purpose of this study was to examine the relationship between pipe lengths and break rates in order to test the proposal of Andreou (1986) that break rate could be found to be proportional to the square root of the length of a pipe.

This model has been applied to an estimated number of pipes divided into four groups by dimension, for the Swedish cities of Stockholm, Göteborg, Malmö, Västerås, Linköping and Örebro. Figures used in the model included the total number of meters of water pipes in each city, irrespective of material, for each of the four dimension groups: 19-110 mm, 125-200 mm, 225-400 mm and >400 mm. An assumed mean length for each dimension group was used to estimate the number of pipes.

The study showed that the relationship assumed by Andreou could hold, but that there are other possible relationships as well. The short spectrum of estimated mean lengths is probably a contributing factor. In order to study the model in greater detail, further studies would require more detailed information as to pipe lengths and their variations in the different dimension groups.

Innehållsförteckning

Bakgrund	1
Modellansats och indata	1
Modellens syfte	1
Modellförslag	1
Resultat	4
Felkällor	7
Vidare undersökningar	7
Referenser	7
Bilagor	9

Bakgrund

Ofta förekommer det att man vid analys av vattenledningars driftstörningsdata använder fel/km som felintensitet. Ett flertal jämförande undersökningar av ledningssystem har använt denna parameter för att undersöka faktorer som tros inverka negativt på ledningars hållbarhet, Wengström (1991).

Andreou (1986), Andreou and Marks (1987) och Andreou, Marks and Clark (1987) jämförde driftstörningar från två större städer, New Haven och Cincinnati, i en regressionsmodell. Felintensiteten uppskattades med hjälp av variablerna, ledningslängd, invändigt tryck, bebyggelsegrad, installationsperioder, ålder vid fel samt tidigare fel, (bilaga 1). Vid regressionsanalysen användes Coxs modell med exponentiell regression där variablerna adderas, bilaga 1. Utförda regressionsanalyser visade på låga eller mycket varierande inflytande för samtliga variabler förutom för ledningslängd. Regressionskoefficienten uppskattades till 0,5 dels för New Haven (system A) samt delvis även för Cincinnati (system B). Detta innebär att felintensiteten uppskattningsvis var proportionell mot roten ur ledningslängden. Bilaga 1 visar att systemen hade stor spännvidd i ledningslängd. Ledning definierades som ledningssträcka utan dimensionsförändring mellan två knutpunkter.

Modellansats och indata

I samband med en kurs ledd av Johan Karlsson, matematiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola, har under våren 1991 ett försök gjorts att använda ovanstående resultat i en modell. I detta försök har använts uppgifter från Stockholms VA-verk (Bo Westergren), Göteborgs VA-verk (Olle Ljunggren) och Örebro Tekniska Förvaltning (Teddy Kärrman och Anders Sjögren). Under hösten 1991 kompletterades arbetet med uppgifter från Malmö Gatukontor (Peter Stahre), Västerås Gatukontor (Claes Granlund) och Tekniska verken i Linköping (Bo Samuelsson/Bo Göran Lindquist).

Modellens syfte

Modellen syftar till att använda de fåtal variabler som kan erhållas ur befintlig statistik över driftstörningar. Modellen ansluter sig väl till etablerade uppfattningar (Andreou mfl). Den är även intressant för simuleringar av felintensitet på ledningar, som ofta innebär klassning av ledningssystem (Walski, Male and Slutsky, 1990) eller att man generellt sätter enhetliga ledningslängder (Goulter, 1986 och Wagner, Shamir and Marks, 1988). Förhållandet mellan individuella ledningars längd och deras felbenägenhet är därför viktigt att undersöka.

Modellförslag

Vid en litteraturstudie (Wengström, 1991) gjordes en sammanställning av felintensiteten på vattenledningar i olika städer så som fig 1a och b visar. Driftstörningarna, presenterade i fig 1b, syns möjligen inte vara proportionella mot roten ur systemlängden.

För att undersöka detta gjordes en modell för att testa förhållandet från Andreou, Marks and Clark (1987) på ytterligare några system. Modellantagandet var (ekv 1-ekv 3) att antalet fel i ett system med många ledningar kan uppskattas vara proportionellt mot roten ur hela systemets längd samt att ingående grupper även de kan uppskattas ha ett antal fel som är proportionellt mot roten ur ledningslängden inom gruppen. Erhålls för flera system en någorlunda lika proportionalitetskoefficient, C, så kan Andreous antagande anses vara trovärdigt, dvs att antalet fel i ett ledningssystem är proportionellt mot roten ur medellängden.

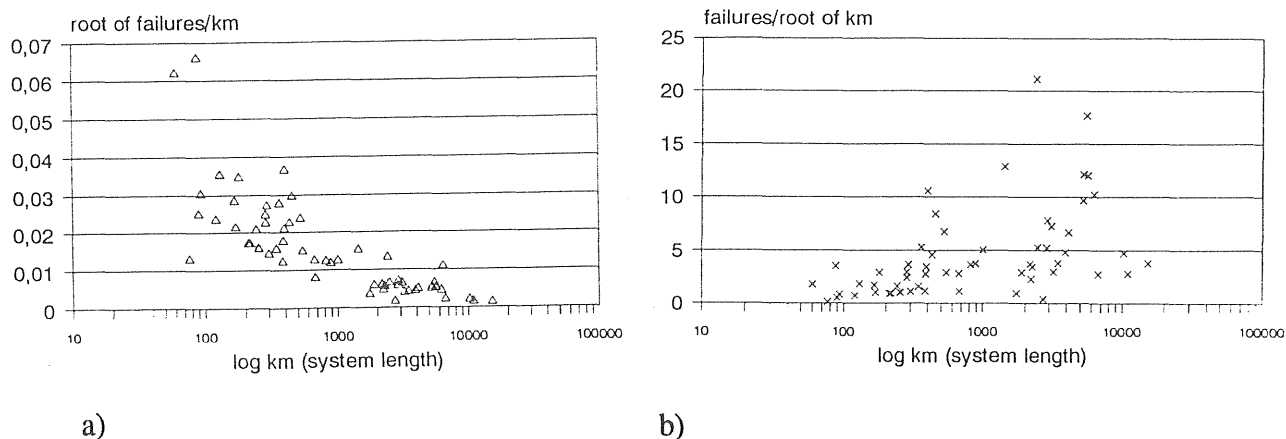


Fig 1a och b Ett 60-tal olika städers driftstörningar i förhållande till sina systems totala längd, dels som i a, illustrerat med roten ur felen och dels som i b, som förhållandet fel/roten ur systemlängden (Wengström, 1992).

För en ledning gäller:

$$f = C\sqrt{l} \tag{1}$$

För en grupp av k ledningar med längden l_ϕ :

$$f_k = C k_\phi \sqrt{l_\phi} \tag{2}$$

För ett system av ledningsgrupper:

$$f_{syst} = \sum_{\phi}^{syst} f_k = C \sum_{\phi}^{syst} k_\phi \sqrt{l_\phi} \tag{3}$$

- f = antal fel
- C = konstant
- l = ledningslängd
- k = antal ledningar
- ϕ = dimensionsgrupp

Driftstörningsstatistik innehåller vanligtvis inte antalet ledningar, utan antal lagda meter i varje ledningsdimension. Dessa uppgifter insamlades från sex städer. Med hjälp av en antagen medellängd för varje dimensionsgrupp uppskattades antalet ledningar. Tabell 1 visar den i modellen antagna medellängden som beräknats på inlagrade uppgifter från Örebro's ledningsnät.

Tabell 1 Uppskattad medellängd för dimensionsgrupper av ledningar i Örebro. Bearbetningen utförd sommaren 1989.

Använda dimensioner i millimeter	Total ledningslängd i meter	Beräknad medellängd*
40 tom 110	14 141	82
150 tom 200	136 021	104
225 tom 400	27 366	121
700 tom 800	41 660	166

* = viktat medelvärde utav flera medelvärden

Varje kommuns ledningsnäts lokala ledningar, distributionsledningar, matarledningar och huvudvattenledningar har grupperats i dimensionsgrupper. Observera att inom grupperna varierade dimensionerna olika mellan kommunerna, se bilaga 2. Figur 2 visar förhållandet mellan dimensionsgrupperna i de sex kommunerna. I detta försök kan antalet klena ledningar, klenare än 150 mm, uppskattas till ca 15-40%. Andreous undersökning gällde ledningar lika med eller grövre än 150 mm. Av dessa utgjorde 150 mm-ledningar endast ca 1,2% för New Haven respektive 0,7% för Cincinnati. Bilaga 3 visar utförda beräkningar med uppskattade antal ledningar för varje grupp samt den beräknade proportionalitetskoefficienten, C.

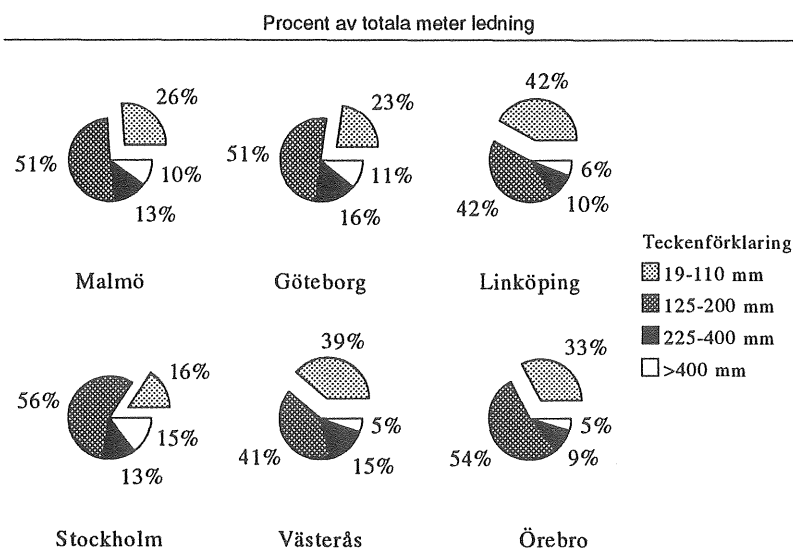


Fig 2 Indelning av de sex städernas ledningsdimensioner i modellen.

Resultat

Tabell 2 visar resultaten från modellberäkningen för samtliga sex städer. Resultaten visar ganska enhetliga värden och det i modellen antagna förhållandet borde kunna gälla. Förmodligen kan den lilla spännvidden i valda medellängder vara en bidragande orsak till att antagandet stämmer. Det vill säga, att troligen kan ett flertal andra förhållanden också antagas stämma. På försök antogs även ett linjärt förhållande, ekv 4 -ekv 5, och proportionalitetskoefficienten C' undersöktes. Tabell 3 redovisar resultatet från dessa beräkningar. En jämförelse av erhållna värden C och C' visar inte inbördes någon markant skillnad. Detta innebär att också det linjära förhållandet är möjligt. Resultatet visar främst att det ur befintlig driftstörningsstatistik, där ledningarna är lagrade så som korta delsträckor, är svårt att med denna modell visa att ett förhållande mellan längd och antal fel gäller. Under "Felkällor" beskrivs de olikheter i ingående datamaterial som har betydelse för utförda beräkningar.

Om l_ϕ är konstant kan ekvation (3) omskrivas till:

$$f_{\text{sys}} = C \sum k_\phi \frac{l}{\sqrt{l}} = \frac{C}{\sqrt{l}} \sum k_\phi l \quad (4)$$

$\sum k_\phi l$ är systemets totala ledningslängd L , vilket ger

$$f_{\text{sys}} = \frac{C'}{\sqrt{l}} L \quad (5)$$

Tabell 2 Beräknade C-värden med ekv 3 för Stockholm, Göteborg, Örebro, Malmö, Västerås och Linköping.

	Beräknade C-värden	Data från tidsperiod	Antal fel per år
Göteborg	1,57 E-3	1977-1981 medelvärde	238,5
Linköping	0,55 E-3	1989-1991 medelvärde	38,3
Malmö	1,20 E-3	1985-1989 medelvärde	94,4
Stockholm	1,49 E-3	1987	255
	1,76 E-3	1988	300
Västerås	1,44 E-3	1987-1990 medelvärde	70,8
Örebro	1,25 E-3	1987	75

Tabell 3 Beräknade C'-värden med ekv 3 för Stockholm, Göteborg, Örebro, Malmö, Västerås och Linköping.

	Antal fel per år	Total ledningslängd i meter	C'/I-värde
Göteborg	238,5	1 558 893	1,53 E-4
Linköping	38,4	686 500	0,56 E-4
Malmö	94,4	801 800	1,18 E-4
Stockholm	255	1 778 483	1,43 E-4
	300		1,67 E-4
Västerås	70,8	507 123	1,40 E-4
Örebro	75	597 052	1,26 E-4

Man kan även jämföra, för varje grupp, de i driftstörningsdata aktuella värdena med det ur modellerna skattade värdet, tabell 4. Tabell 4 är även uppritad i figur 3. Modellerna har ingen större avvikelse sinsemellan vilket överensstämmer med det som tidigare sagts. Avvikelsen från de aktuella driftstörningsvärdena är liten i några dimensionsgrupper, men ger generellt inte någon god träffsäkerhet.

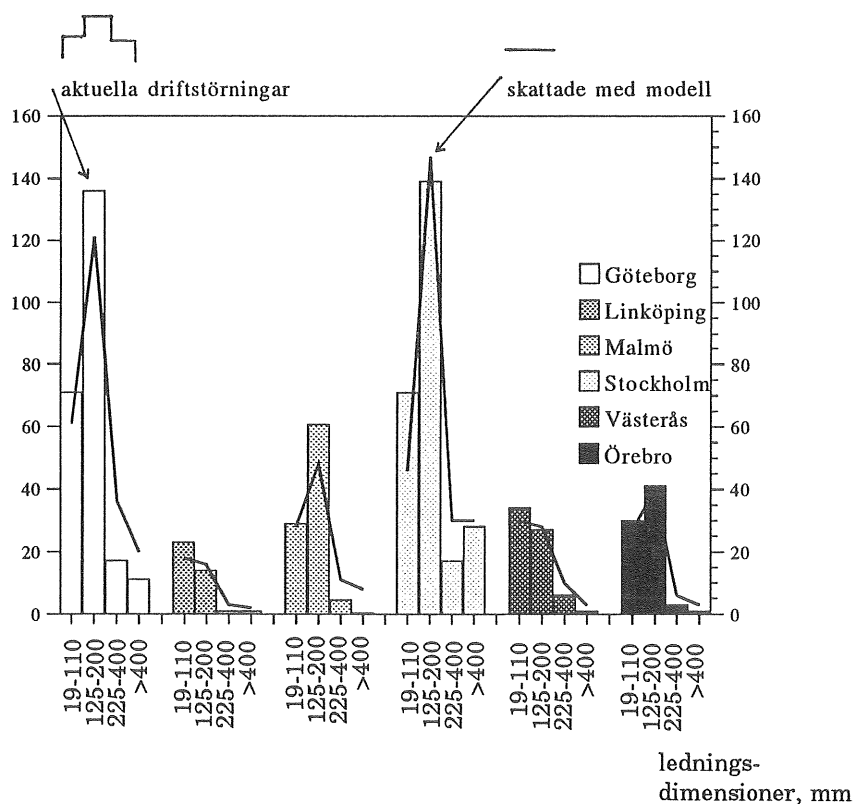


Fig 3. Jämförelse av C-modell med aktuella driftstörningar från de sex städerna.

Tabell 4 Jämförelse mellan det med C och C'-modellerna skattade antalet fel och antal inträffade fel för de sex städerna.

Dimensionsgrupp	driftstörningar min-max eller medel	fel skattade med C-modell	fel skattade med C'/I-modell
Göteborg:			
lokala ledningar	71	61	54
distributionsledningar	136	121	121
matarledningar	17	36	38
huvudvattenledningar	11	20	26
Linköping:			
lokala ledningar	23	18	16
distributionsledningar	14	16	16
matarledningar	1	3	4
huvudvattenledningar	1	2	2
Malmö:			
lokala ledningar	23 - 35	28	25
distributionsledningar	47 - 74	48	48
matarledningar	1 - 8	11	12
huvudvattenledningar	0 - 1	8	6
Stockholm:			
lokala ledningar	98 / 71	55 / 46	47 / 40
distributionsledningar	169 / 139	173 / 147	167 / 144
matarledningar	17 / 17	37 / 30	39 / 33
huvudvattenledningar	16 / 28	36 / 30	44 / 37
Västerås*:			
lokala ledningar	18 - 50	30	28
distributionsledningar	17 - 37	28	29
matarledningar	3 - 9	10	11
huvudvattenledningar	0 - 2	3	4
Örebro:			
lokala ledningar	30	27	24
distributionsledningar	41	40	41
matarledningar	3	6	6
huvudvattenledningar	1	3	4

* = aktuella driftstörningar för Västerås är ungefärliga.

Felkällor

En kommuns ledningssystem består av ett flertal olika ledningsmaterial och dimensioner. Modellens beskrivning är starkt förenklad genom att enbart fyra dimensionsgrupper använts och dessutom utan hänsyn till olika ledningsmaterial. Dimensionsgrupperna är indelade för att överensstämja med de tillgängliga dimensionerna vid skattningen av medellängderna. Vald indelning i enbart fyra dimensionsgrupper och valda medellängder har stor betydelse för beräknade proportionalitetskoefficienters relevans.

Att olika dimensioner verkligen uppvisar skillnader i antalet fel har visats bl a av Goulter och Kettler (1985), Kowalewski (1976) och van der Hoven (1988). Dessa har påvisat att felen minskar med ökande ledningsdiameter i flera olika ledningssystem.

De driftstörningsdata som har använts i modellen är redovisade för olika långa tidsperioder. Varierande längd på tidsperioden är troligen även det en felkälla.

Vidare undersökningar

Felintensiteten, fel/km, ger inga indikationer om vilka variabler som är viktiga för att bestämma när och hur ofta en ledningsskada uppstår. De viktigaste variablerna anses vara invändigt tryck, bebyggelsegrad, ålder då andra felet inträffar, läggningsperiod och antal tidigare fel på ledningen enligt Goodrich, Adams and Clark (1985). Feltypens inverkan på felhändelserna skulle kunna vara mer av intresse.

Felintensitet uttryckt i km eller m är därför mindre aktuellt att använda för individuella ledningar vid jämförelser. Andra typer av felintensitet torde dock vara intressanta att undersöka. Vid fortsatta undersökningar skulle noggrannare uppgifter om ledningslängder och deras variation inom olika dimensionsgrupper behövas om modellantagandet ska kunna undersökas utförligare.

Referenser

- Andreou, S A. 1986. Predictive Models for Pipe Break Failures and Their Implications on Maintenance Planning Strategies for Deteriorating Water Distribution System. Massachusetts Institute of Technology (MIT), diploma.
- Andreou, S A, and Marks, D. 1987. Maintenance decisions for Deteriorating Water Pipelines. *Journal of Pipelines*, 7 (1987), p 21-31.
- Andreou, S A, Marks, D H, and Clark, R M. 1987. A New Methodology for Modelling Break Failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Theory. *Journal of Adv. Water Resources*, 1987, Vol 10, March 1987, p 2-10.
- Andreou, S A, Marks, D H, and Clark, R M. 1987. A New Methodology for Modelling Break Failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Applications. *Journal of Adv. Water Resources*, 1987, Vol 10, March 1987, p 11-20.

- Goodrich, J A, Adams, J Q and Clark, M. 1985. Data Base Development for Water Distribution Systems. *Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age*, Vol 1, ASCE, New York, NY, p 336-340
- Goulter, I C. 1986. Multi-Objective Optimization of Water Distribution Networks. *Civ. Eng. Syst.*, Vol 3, No 4, Dec 1986, p 222-231.
- Goulter, I C, and Kettler, A J. 1985. An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water Distribution networks. *Can. J. Civ. Eng.*, Vol 12, 1985, p 286-293.
- van der Hoven, J J. 1988. Methods to Determine Quantitative and Qualitative Reliability of Water Distribution Systems. *Journal of Water Supply*, Vol 6, S5. pp 13-16.
- Kowalewski, P. 1976. Rohrbruchuntersuchungen. *Das Gas- und Wasserfach - Wasser/Abwasser*, 117, Jahrgang 1976, Heft 8, p 358-363.
- Wagner, Janet M, Shamir, U and Marks, D H. 1988. Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 114, No 3, May 1988.
- Walski, T M, Male, J, and Slutsky, A H. 1990. Analyzing Water Main Replacement Policies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No 3, May/June 1990, p 362-374.
- Wengström, T Rd. 1992. Comparative Analysis of Pipe Break Rates - Literature Review. Chalmers Tekniska Högskola (under publicering).

Jämförelse av städerna Cincinnati (system B) och New Haven (system A), (Andreou, Marks and Clark, Applications, 1987)

Variable	System B	System A
Number of pipes	452	1391
Number of pipes with one or more breaks	185 (41%)	292 (21%)
Diameter in inches: mean	26	14.5
median	24	12
minimum	6	6
maximum	96	48
Lenght in feet: mean	3245	1901
median	2100	1500
minimum	20	100
maximum	22240	14000
Pressure in psi: mean	89	79
median	78	75
minimum	15	4
maximum	226	173
Percentage pipe in highly corrosive soil (mean)	42%	*
Pipe type in %of cast iron	81	96
Installation periods: installation date, oldest	1856	1900
median installation date	1942	1935
installed before 1900	10%	-

* Soil corrosivity was defined differently in system A. Instead of indicating the percentage of pipe in corrosive soil, only whether a pipe was under corrosive or noncorrosive soil was defined. In that respect, 31% of the pipes in A were in corrosive soil.

Använd modell (Andreou and Marks 1987)

$$\text{Coxs modell: } h(t; z) = h_0(t)e^{zb}$$

h	=	felintensiteten (fel/år)
h_0	=	ospecificerad basfunktion av formen
$h(t)$	=	$a_1 - a_2t + a_3t^2$ där $a > 0$
t	=	tid
b	=	regressions koefficient
z	=	variabler

Modellens variabler och erhållna regressionskoefficienter (Andreou and Marks, 1987)

	Variable z_i	Coefficient b_i	Standard error
Logarithm of pipe length (feet)	LNLENGHT	0.5299	0.0666
Internal pipe pressure (psi), if pipe has no breaks, 0 otherwise.	PRESBRK	0.9310	0.2760
Fraction of pipe covered by low land development (measured from 0 to 1).	LOW	-0.5404	0.1222
=1 if pipe installed in the period 1930-1950, 0 otherwise.	C35	-0.6459	0.1258
=1 if pipe installed after 1950, 0 otherwise.	C50	0.2631	0.1365
=2/(pipe age at second break), if pipe has two breaks, 0 otherwise.	AGEBRK	1.7839	0.5831
=1 if pipe has one or two breaks, 0 otherwise.	P12	1.5726	0.2626

Indata för Göteborg

Dimensioner i millimeter	anlagda meter	driftstörningar medel 5 år
1400	1070	
1200	10891	
1000	32456	
900		
800	21581	
750	69	
700	8493	
600	35203	10,4
525-584	562	
500	50071	
470-483	97	
450	7366	0,3
<i>sammanräknade meter</i>	<i>167 859</i>	
400	83805	6,3
381		
375	45	
350	21591	1,9
300	95816	4,8
250	49003	3,9
225-229		
<i>sammanräknade meter</i>	<i>250 260</i>	
200	276827	39,3
150	403156	88,7
140	4828	
125-127	103343	8,1
<i>sammanräknade meter</i>	<i>788 154</i>	
110	4433	
100	230233	73,6
90	4065	
80	11131	0,9
75	2401	
70	335	
63	19737	
51	53017	
50	6502	0,25
40	2898	
38	13833	
32	3632	
25	205	
19	198	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>352 620</i>	
Totalt	1558 893	238,5

Indata Linköping

Dimensioner i millimeter	anlagda meter	driftstörningar medel 3 år
1400 1200 900-1000	14000	
600-800 525-584 500 470-483 450	16000 11000	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>41 000</i>	<i>1</i>
400 381 250-375 225-229	14000 49000 4000	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>67 000</i>	<i>0,67</i>
200 150-180 125-140	84000 184000 22500	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>290 000</i>	<i>14</i>
100-110 70-90 38-65 19-32	130000 25000 129000 4000	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>288 500</i>	<i>22,67</i>
Totalt	686 500	115/3=38,3

Indata för Malmö

Dimensioner i millimeter	anlagda meter	driftstörningar antal				
		1985	1986	1987	1988	1989
1400						
1200	1740					
1000	3000					
900	16400				1	
800						
750						
700	400					
600	50500			1		
525-584						
500	6000					
470-483						
450	3100					
<i>sammanräknade meter</i>	<i>81 140</i>					
400	12600					
381						
375	6900					
350-355	2120					
300-315	34580	1		2		2
250	46100	5	1	5	2	6
225-229						
<i>sammanräknade meter</i>	<i>102 300</i>					
200	78960	7	9	9	8	6
150-180	327560	60	49	65	45	41
140						
125-127	3060					
<i>sammanräknade meter</i>	<i>409 580</i>					
110	4180					
100	142160	22	20	32	26	18
90	8660	3	5	3	5	5
80	4900					
75	6640					
70						
63-65	29040					
51						
50	10480					
40	2720					
38						
32						
25						
19						
<i>sammanräknade meter</i>	<i>208 780</i>					
Totalt	801 800	98	84	117	87	78

Indata för Stockholm

Dimensioner i millimeter	anlagda meter	driftstörningar		
		1987	1988	
1400	3462			
1200	18993	3	5	
1000	73286	6	3	
900	14536	0		
800	49471	1	1	
750				
700	26201	9	7	
600	27941	4		
525-584	4216	0		
500	40356	5		
470-483	2518			
450	205			
<i>sammanräknade meter</i>	<i>261 185</i>			
400	38184	2	2	
381	3455			
375				
350-355	12124	1		
300-315	130052	13	10	
250	43286	1	5	
225-229	3936			
<i>sammanräknade meter</i>	<i>231 037</i>			
200	258674	24	33	
150-180	728438	115	136	
140				
125-127	17399			
<i>sammanräknade meter</i>	<i>1004 511</i>			
110	281750	66	90	
100				
90				
80			0	1
75				
70				
63-65				
51				2
50			1	3
40				
38			2	2
32			2	
25				
19				
<i>sammanräknade meter</i>	<i>281 750</i>			
Totalt	1778 483	255	300	

Indata för Västerås

Dimensioner i millimeter	anlagda meter	driftstörning * 1987-90
1400		
1200	82	
1000	759	
900		
800	8242	
750		
700	5389	
600	9818	
525-584		
500	2797	
470-483		
450	151	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>27 238</i>	
400	14802	
381		
375		
350-355	5073	
300-315	22908	
250	17081	
225-229	17715	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>77 579</i>	
200	68788	
150-180	123122	
140		
125-127	13561	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>205 471</i>	
110	280	
100	111169	
90	4909	
80		
75	21724	
70		
63-65	43761	
51		
50	11198	
40	2567	
38	852	
32	375	
25		
19		
<i>sammanräknade meter</i>	<i>196 835</i>	
Totalt	507 123	283/4=70,8

* erhållna driftstörningar var grupperade i andra dimensionsgrupper

Indata för Örebro

Dimensioner i millimeter	anlagda meter	driftstörningar antal 1987
1400		
1200		
1000		
900		
800	355	
750		
700	13534	1
600		
525-584		
500	14505	
470-483		
450		
<i>sammanräknade meter</i>	<i>28 394</i>	
400	1911	
381		
375		
350-355		
300-315	25046	0
250		
225-229	24458	3
<i>sammanräknade meter</i>	<i>51 415</i>	
200	66352	8
150-180	187637	30
140	67442	3
125-127	1495	
<i>sammanräknade meter</i>	<i>322 926</i>	
110	37959	
100	63683	21
90	4141	
80	12485	
75	6660	
70		
63-65	39201	1
51	3022	
50	22502	8
40	4664	
38		
32		
25		
19		
<i>sammanräknade meter</i>	<i>194 317</i>	
Totalt	597 052	75

Utförda beräkningar för Göteborg

Dimension i millimeter (ϕ)	Anlagda meter ledning	Använd medellängd i meter (l_{ϕ})	Uppskattat antal ledningar (k_{ϕ})
19-110	352 620	82	4300
125-200	788 154	104	7578
225-400	250 260	121	2068
>400	167 859	166	1011
	Tot: 1558 893		

Systemets antal fel modelleras

$$\begin{aligned}
 &= 4300 \cdot C \cdot \sqrt{82} + 7578 \cdot C \cdot \sqrt{104} + 2068 \cdot C \cdot \sqrt{121} + 1011 \cdot C \cdot \sqrt{166} \\
 &= 38938 \cdot C + 77281 \cdot C + 22748 \cdot C + 13026 \cdot C \\
 &= 151993 \cdot C \\
 &\text{Med givet antal fel i systemet} = 238,5 \text{ erhålls} \\
 &C = 1,57 \text{ E-3}
 \end{aligned}$$

Utförda beräkningar för Linköping

Dimension i millimeter (ϕ)	Anlagda meter ledning	Använd medellängd i meter (l_{ϕ})	Uppskattat antal ledningar (k_{ϕ})
19-110	288 500	82	3518
125-200	290 000	104	2788
225-400	67 000	121	554
>400	41 000	166	247
	Tot: 686 500		

Systemets antal fel modelleras

$$\begin{aligned}
 &= 3518 \cdot C \cdot \sqrt{82} + 2788 \cdot C \cdot \sqrt{104} + 554 \cdot C \cdot \sqrt{121} + 247 \cdot C \cdot \sqrt{166} \\
 &= 31857 \cdot C + 28432 \cdot C + 6094 \cdot C + 3182 \cdot C \\
 &= 69565 \cdot C \\
 &\text{Med givet antal fel i systemet} = 38,3 \text{ erhålls} \\
 &C = 0,55 \text{ E-3}
 \end{aligned}$$

Utförda beräkningar för Malmö

Dimension i millimeter (ϕ)	Anlagda meter ledning	Använd medellängd i meter (l_v)	Uppskattat antal ledningar (k_v)
19-110	208 780	82	2546
125-200	409 580	104	3938
225-400	102 300	121	845
>400	81 140	166	489
	Tot: 801 800		

Systemets antal fel modelleras

$$\begin{aligned}
 &= 2546 \cdot C \cdot \sqrt{82} + 3938 \cdot C \cdot \sqrt{104} + 845 \cdot C \cdot \sqrt{121} + 489 \cdot C \cdot \sqrt{166} \\
 &= 23055 \cdot C + 40160 \cdot C + 9295 \cdot C + 6300 \cdot C \\
 &= 78810 \cdot C \\
 &\text{Med givet antal fel i systemet} = 94,4 \text{ erhålls} \\
 &C = 1,20 \text{ E-3}
 \end{aligned}$$

Utförda beräkningar för Stockholm

Dimension i millimeter (ϕ)	Anlagda meter ledning	Använd medellängd i meter (l_v)	Uppskattat antal ledningar (k_v)
19-110	281 750	82	3436
125-200	1004 511	104	9659
225-400	231 037	121	1909
>400	261 185	166	1573
	Tot: 1 778 483		

Systemets antal fel modelleras

$$\begin{aligned}
 &= 3436 \cdot C \cdot \sqrt{82} + 9659 \cdot C \cdot \sqrt{104} + 1909 \cdot C \cdot \sqrt{121} + 1573 \cdot C \cdot \sqrt{166} \\
 &= 31114 \cdot C + 98503 \cdot C + 20999 \cdot C + 20267 \cdot C \\
 &= 170883 \cdot C \\
 &\text{Med givet antal fel i systemet} = 300 \text{ respektive } 255 \text{ erhålls} \\
 &C = 1,76 \text{ E-3 respektive } 1,49 \text{ E-3}
 \end{aligned}$$

Utförda beräkningar för Västerås

Dimension i millimeter (ϕ)	Anlagda meter ledning	Använd medellängd i meter (l_{ϕ})	Uppskattat antal ledningar (k_{ϕ})
19-110	196 835	82	2400
125-200	295 471	104	1976
225-400	77 579	121	641
>400	27 238	166	164
	Tot: 507 123		

Systemets antal fel modelleras

$$\begin{aligned}
 &= 2400 \cdot C \cdot \sqrt{82} + 1976 \cdot C \cdot \sqrt{104} + 641 \cdot C \cdot \sqrt{121} + 164 \cdot C \cdot \sqrt{166} \\
 &= 21733 \cdot C + 20151 \cdot C + 7051 \cdot C + 2113 \cdot C \\
 &= 51048 \cdot C \\
 &\text{Med givet antal fel i systemet} = 70,8 \text{ erhålls} \\
 &C = 1,38 \text{ E-3}
 \end{aligned}$$

Utförda beräkningar för Örebro

Dimension i millimeter (ϕ)	Anlagda meter ledning	Använd medellängd i meter (l_{ϕ})	Uppskattat antal ledningar (k_{ϕ})
19-110	194 317	82	2368
125-200	322 926	104	3105
225-400	51 415	121	425
>400	28 394	166	171
	Tot: 597 052		

Systemets antal fel modelleras

$$\begin{aligned}
 &= 2368 \cdot C \cdot \sqrt{82} + 3105 \cdot C \cdot \sqrt{104} + 425 \cdot C \cdot \sqrt{121} + 171 \cdot C \cdot \sqrt{166} \\
 &= 21443 \cdot C + 31666 \cdot C + 4675 \cdot C + 2203 \cdot C \\
 &= 59987 \cdot C \\
 &\text{Med givet antal fel i systemet} = 75 \text{ erhålls} \\
 &C = 1,25 \text{ E-3}
 \end{aligned}$$

