

---

# Riktlinjer för modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem

---

Daniel Blomquist  
Andréas Karlsson  
Jonatan Larsson  
Bengt Zagerholm

---

# Svenskt Vatten

## UTVECKLING

---

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL [svensktvatten@svensktvatten.se](mailto:svensktvatten@svensktvatten.se)

[www.svensktvatten.se](http://www.svensktvatten.se)

---

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RAPPORTENS TITEL    | Riktlinjer för modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| TITLE OF THE REPORT | Guidelines for modeling of pressurized water and sewage systems                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| FÖRFATTARE          | Daniel Blomquist, Andréas Karlsson, Jonatan Larsson och Bengt Zagerholm, Sweco                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| RAPPORTNUMMER       | 2021-13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| ANTAL SIDOR         | 95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| SAMMANDRAG          | En modell är en förenklad bild av verkligheten. Rapporten ska vara en hjälp för VA-huvudmännen när de beställer eller upphandlar hydrauliska modeller för trycksatta VA-system, och den ska fungera som en handbok för personer som bygger upp och arbetar med modellerna. Syftet är att höja standarden, ge riktlinjer och skapa en gemensam grund för alla som arbetar med hydraulisk modellering. |
| SUMMARY             | The report should be an aid for the client when ordering or procuring a hydraulic model. It will serve as a handbook for professionals who build and work with models. The aim is to improve the best practices, provide guidelines and create a common basis for everyone who works with the modeling of pressurized systems for water and sewage.                                                  |
| SÖKORD              | Hydraulisk modellering, trycksatta nät, vattennätsmodellering, LTA-nät, LTA-system, tryckavlopp, tryckavloppsmodellering, tryckavloppsmodell                                                                                                                                                                                                                                                         |
| KEYWORDS            | Hydraulic modeling, pressurized nets, water network modeling, LPS-net, LPS-system, low pressure system sewer                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| MÅLGRUPPER          | De som arbetar med modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem, de som beställer modellerna samt beslutsfattare och politiker med anknytning till vatten och avlopp                                                                                                                                                                                                                          |
| RAPPORT             | Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. <a href="https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/">https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/</a>                                                                                                                                                                                                                                               |
| UTGIVNINGÅR         | 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| UTGIVARE            | © Svenskt Vatten AB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| REFERENS            | Blomquist D., Karlsson A., Larsson J. och Zagerholm B. (2021). Riktlinjer för modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem. SVU-rapport 2021-13. Stockholm, Svenskt Vatten.                                                                                                                                                                                                                   |

### Om projektet

|                         |                                                                    |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| PROJEKTNUMMER           | 18-115                                                             |
| PROJEKTETS NAMN         | Riktlinjer för modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem |
| PROJEKTETS FINANSIERING | Svenskt Vatten Utveckling, Sweco                                   |

---

# Förord

Modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem är ett effektivt sätt att simulera verkligheten matematiskt och möjliggöra en visuell presentation av resultaten. Till vår hjälp har vi olika modelleringsprogram som baseras på teoretisk metodik. De ger oss förståelse för hur våra rörnät fungerar i verkligheten. Det gör det möjligt för oss att identifiera svaga länkar i systemen och ineffektiva konstruktioner samt att analysera driftmönster. Detta är en viktig byggsten i vår strävan efter ett samhälle som skapar högre livskvalitet och sliter mindre på vår jord.

Modellering av trycksatta system, till exempel dricksvattennät, är en komplicerad process, vilket medför att beställarens syfte och mål med projektet kan uppfyllas av modellören på olika sätt, och olika metodik kan väljas för att nå slutmålet. Detaljeringsgraden i modelluppbyggnaden och ansatta randvillkor kan dock spela stor roll för resultatet.

Svenskt Vatten med flera har tidigare utarbetat riktlinjer för olika arbetsområden inom VA-sektorn för att underlätta för VA-huvudmannen, uppnå bättre resultat och undvika dubbelarbete. Bland annat har ”Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem” (SVU-rapport 2016-15) och ”Dokumentation vid modellering av avloppsledningsnät” (SVU-rapport 2020-15) publicerats. Föreliggande rapport är skriven för att på samma sätt ge riktlinjer för hydraulisk modellering av trycksatta system.

Målet med rapporten har varit att hjälpa beställare att beställa rätt modell och modellören att lägga sig på rätt nivå. Här samlas förväntningar på hydrauliska modeller och underlag till kravspecifikationer. Beställarens behov och experternas kunskap möts för att beskriva och utveckla hydraulisk modellering i Sverige.

Syftet var att höja standarden, ge riktlinjer för tekniska minimikrav, skapa en gemensam grund för att höja ambitionsnivån hos både beställare och modellör, reducera arbetstid samt producera resultat med högre kvalitet för att i slutändan kunna göra rätt investeringar.

Arbetet har finansierats av Svenskt Vatten Utveckling och Sweco. Rapporten har skrivits av en arbetsgrupp från Sweco bestående av Daniel Blomquist, Andréas Karlsson, Jonatan Larsson, Bengt Zagerholm och Ove Nordmark.

Rapporten har granskats och förbättrats av en referensgrupp bestående av personer med erfarenhet av att arbeta med och beställa hydrauliska modeller. Följande organisationer och företag har varit representerade i referensgruppen: Botkyrka kommun, Kretslopp och vatten Göteborg, NSVA, Stockholm Vatten och Avfall, VA SYD, Vakin, DHI, Ramböll, Tyréns, WSP.

Författarna



---

# Innehåll

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Förord.....                                                                    | 2         |
| Sammanfattning .....                                                           | 5         |
| Summary .....                                                                  | 6         |
| Begreppsförklaringar .....                                                     | 7         |
| <b>Del 1: Vad är en hydraulisk modell och vad kan den användas till? .....</b> | <b>9</b>  |
| <b>1 Hydraulisk modellering .....</b>                                          | <b>10</b> |
| 1.1 Bakgrund och syfte.....                                                    | 10        |
| 1.2 Modellering av trycksatta vattensystem.....                                | 10        |
| 1.3 Arbetsgång vid hydraulisk modellering av vattensystem .....                | 13        |
| 1.4 Modellering av trycksatta avloppssystem .....                              | 13        |
| <b>Del 2: Anvisningar till beställare av modelluppdrag .....</b>               | <b>14</b> |
| <b>2 Att beställa hydrauliska modeller .....</b>                               | <b>15</b> |
| 2.1 Introduktion .....                                                         | 15        |
| 2.2 Kvalitetssäkring och dokumentation .....                                   | 15        |
| 2.3 Upphandling av modeller .....                                              | 15        |
| 2.4 Datasäkerhet .....                                                         | 17        |
| 2.5 Förvaltning av modeller .....                                              | 17        |
| <b>3 Modeller för olika syften .....</b>                                       | <b>19</b> |
| 3.1 Principer för en hydraulisk modell .....                                   | 19        |
| 3.2 Beräkningar i ett eller flera tidssteg .....                               | 19        |
| 3.3 Modellavgränsning .....                                                    | 19        |
| 3.4 Modellering av befintliga system .....                                     | 21        |
| 3.5 Vattenkvalitetsberäkningar .....                                           | 21        |
| 3.6 Simulering av krisscenarier .....                                          | 22        |
| 3.7 Dimensionering av ledningssystem i nya områden .....                       | 22        |
| 3.8 Realtidssimuleringar och artificiell intelligens .....                     | 22        |
| 3.9 Transientberäkningar .....                                                 | 23        |
| 3.10 Dimensionering av tryckavloppssystem .....                                | 23        |
| 3.11 Analys av befintliga tryckavloppssystem .....                             | 24        |
| <b>4 Uppbyggnad av modeller .....</b>                                          | <b>25</b> |
| 4.1 Uppbyggnad av vattennätsmodell .....                                       | 25        |
| 4.2 Uppbyggnad av tryckavloppsmodell .....                                     | 28        |
| 4.3 Uppbyggnad av modell för transientberäkningar .....                        | 28        |
| <b>5 Kalibrering av modell .....</b>                                           | <b>30</b> |
| 5.1 Syftet med kalibrering .....                                               | 30        |
| 5.2 Mätdata som underlag till kalibrering .....                                | 30        |
| 5.3 Arbetsgång vid kalibrering .....                                           | 31        |
| 5.4 Uppgifter för beställare inför mätning och kalibrering .....               | 31        |
| 5.5 Simuleringar med färdig modell .....                                       | 31        |
| 5.6 Förenklingar som påverkar modellresultaten .....                           | 31        |
| 5.7 GIS, stödfunktioner .....                                                  | 34        |
| <b>6 Redovisning av resultat .....</b>                                         | <b>36</b> |
| 6.1 Plan med vattentryck .....                                                 | 36        |
| 6.2 Profiler på huvudsträckor .....                                            | 37        |
| 6.3 Plan med vattenhastighet .....                                             | 37        |
| 6.4 Omsättning .....                                                           | 38        |

---

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Del 3: Praktiskt arbete med modellering</b>                         | <b>40</b> |
| <b>7 Teoriintroduktion</b>                                             | <b>41</b> |
| <b>8 Uppbyggnad av modell för vattennätsmodellering</b>                | <b>43</b> |
| 8.1 Randvillkor                                                        | 43        |
| 8.2 Distributionssystemet                                              | 44        |
| <b>9 Uppbyggnad av modell för tryckavloppsmodellering</b>              | <b>49</b> |
| 9.1 Randvillkor                                                        | 49        |
| 9.2 Tryckavlopssystemet                                                | 50        |
| <b>10 Uppbyggnad av modell för transientberäkning</b>                  | <b>53</b> |
| 10.1 Grundläggande krav på en modell för transienta beräkningar        | 53        |
| 10.2 Randvillkor                                                       | 54        |
| 10.3 Ledningar                                                         | 54        |
| 10.4 Noder                                                             | 54        |
| 10.5 Skyddsåtgärder                                                    | 54        |
| <b>11 Kalibrering</b>                                                  | <b>56</b> |
| 11.1 Definition                                                        | 56        |
| 11.2 Insamling av mätdata                                              | 56        |
| 11.3 Analys av mätdata                                                 | 60        |
| 11.4 Flödeskalibrering av vattenmodeller                               | 61        |
| 11.5 Styrning och reglering                                            | 72        |
| 11.6 Pumpar, ventiler och andra anordningar                            | 72        |
| 11.7 Tryckkalibrering                                                  | 72        |
| 11.8 Känslighetsanalys                                                 | 76        |
| <b>12 Simuleringar med färdig modell</b>                               | <b>78</b> |
| 12.1 Nuläge                                                            | 78        |
| 12.2 Scenarier                                                         | 79        |
| 12.3 Dimensionering med hjälp av hydraulisk modell                     | 80        |
| 12.4 Brandvatten                                                       | 82        |
| 12.5 LTA-system                                                        | 83        |
| 12.6 Online-modellering                                                | 83        |
| <b>13 Dokumentation och kvalitetssäkring</b>                           | <b>84</b> |
| 13.1 Dokumentation                                                     | 84        |
| 13.2 Namngivning av modeller                                           | 85        |
| 13.3 Kvalitetssäkring                                                  | 85        |
| 13.4 Konvertering mellan programvaror och versioner                    | 86        |
| 13.5 Uppdatering och kontinuerligt underhåll av modeller               | 86        |
| Referenser                                                             | 88        |
| Bilaga A Indata för uppbyggnad av vattennätsmodell                     | 89        |
| Bilaga B Checklista för uppbyggnad av modellen                         | 91        |
| Bilaga C Ekvivalent råhetstal (k-värde)                                | 92        |
| Bilaga D Mätprotokoll tryckmätning                                     | 94        |
| Bilaga E Förslag på rapportstruktur och rubriker i modelldokumentation | 95        |

---

# Sammanfattning

**En modell är en förenklad bild av verkligheten. Rapporten ska vara en hjälp för VA-huvudmännen när de beställer eller upphandlar hydrauliska modeller för trycksatta VA-system, och den ska fungera som en handbok för personer som bygger upp och arbetar med modellerna. Syftet är att höja standarden, ge riktlinjer och skapa en gemensam grund för alla som arbetar med hydraulisk modellering.**

För att kunna göra rätt investeringar i ett distributionssystem för dricksvatten behöver VA-huvudmannen ha en helhetssyn på systemets funktion och brister. Det behövs bland annat kunskap om kapaciteten hos ledningsnätet, hur robust systemet är mot produktionsbortfall i vattenverket och vilka trånga sektioner som finns. Sådan kunskap går att få med hjälp av hydraulisk modellering, det vill säga modellering av vattenflöden och vattentryck. En hydraulisk datormodell är ett mycket effektivt verktyg som ger förståelse för ledningsnätets funktion och samspelet mellan pumpar, ledningar, ventiler och reservoarer.

Hydraulisk modellering är komplicerat och olika metoder kan ge stora skillnader i resultat. Om beställare, konsulter och modellörer har olika förväntningar blir det också svårt att bedöma om målet med modelleringen har uppnåtts. Hittills har det saknats riktlinjer för arbete med modellering av trycksatta VA-system i Sverige, något som den här rapporten har till syfte att avhjälpa. Arbetet med en hydraulisk modell medför en ordentlig genomgång av distributionssystemet. Det innebär oftast att ledningsägaren får bättre överblick över sitt system och att brister kan upptäckas.

Modellering är en viktig fas i planeringen inför olika projekt, till exempel exploatering, förnyelse av befintligt ledningsnät, dimensionering av reservoarer och tryckstegringsstationer. Med hjälp av modellering kan samhällets resurser användas så effektivt som möjligt. Resultaten från en hydraulisk modell kan på ett tydligt sätt synliggöra effekten av förtätning, exploatering av ett område, effekter av olika åtgärder i systemet eller driftbortfall på någon del av systemet vid till exempel ett längre strömavbrott.

I rapporten beskrivs olika typer av hydrauliska modeller för distributionssystem för trycksatta dricksvatten- och avloppssystem, vilket underlag som behövs för att skapa dem och vad de kan användas till. Syftet är bland annat att hjälpa beställarna att beställa rätt modell för rätt ändamål, och att ge modellörerna riktlinjer och hjälpmedel för att lägga sitt arbete på rätt nivå när det gäller geografisk omfattning och detaljeringsgrad. På det sättet kan standarden höjas på de modeller som görs, onödigt dyra och krångliga modeller kan undvikas, och man kan få till stånd ett gemensamt arbetssätt i Sverige.

Rapporten är indelad i tre delar. Del 1 behandlar hydrauliska modellers användningsområden och ger övergripande fakta; den riktar sig till alla som vill veta mer om modellering. Del 2 riktar sig till beställare av modeller och del 3 till modellörer, det vill säga till dem som gör det praktiska arbetet med modelleringen.

---

# Summary

In order to make the right investments in a distribution system for drinking water, one needs to have a holistic view of the system's function and deficiencies. Among other things, knowledge is needed on the capacity of the piping network, how robust the system is in the event of loss of production at the water supply plant and what bottlenecks there are. Such knowledge can be obtained through hydraulic modeling, i.e. modeling of water flow and water pressure. Hydraulic modeling is complicated and different methods can give large differences in results. If clients, consultants and modelers have different expectations, it will also be difficult to assess whether the goal of the modeling has been achieved. So far, there have been no guidelines for work with modeling of pressurized water supply and sewer systems in Sweden, something that this report aims to remedy. A model is a simplified picture of reality, and the work with a hydraulic models involves reviewing systems in order to discover deficiencies in the system. Modeling is an important phase in the initial planning of various projects, e.g. exploitation, renewal of existing piping networks, dimensioning of reservoirs and pressure boosting stations. With the help of modeling common resources can be used as efficiently as possible. With the results from a hydraulic model, it is easy to visualize the effect of densification, exploitation of an area, effects of various measures in the system or downtime on any part of the system, e.g. a longer power outage. The report describes different types of hydraulic models for distribution systems for drinking water and pressure sewage systems, the data needed to create the models and what they can be used for. The purpose is, among other things, to help the customers to order the right type of model for the right purpose, and to give the modelers guidelines and aids to place their work at a correct level. In this way the standard of the models made can be improved, unnecessarily expensive and complicated models can be avoided, and a common way of working can be established in Sweden. The report is divided into three parts. Part one deals with the uses of hydraulic models and provides overall facts; it is aimed at anyone who wants to know more about modeling. Part two is aimed at customers of models and part three is aimed at modelers.

---

# Begreppsförklaringar

Nedan förklaras ett antal begrepp och förkortningar som används i dokumentet.

**Brandvatten:** Vatten som tas från ledningsnätet med avsikt att användas för brandbekämpning. Jämför med släckvatten som definieras som förorenat vatten från brandbekämpning.

**Börvärde (set point):** Angivet värde som ska uppnås med reglering.

**Distributionsledning:** Vattenledning till vilken servisledning ansluts.

**Huvudledning:** Vattenledning med större dimension, som ingår i ett huvudförsörjningssystem och förbinder produktionsanläggning, reservoarer och större tryckstegringsstationer/ventilkammare. Från dessa ledningar utgår distributionsledningssystemen. Servisledningar ansluts endast i undantagsfall till huvudledningar.

**Hydraulisk modell:** Beräkningsmodell över trycksatta system med ledningar och anläggningar där systemens hydrauliska förhållanden kan beräknas.

**Högreservoar:** Høgt belägen reservoar som är tryckhållande för ledningsnät och som utgör utjämningsvolym för förbrukningsvariation och reservvolym vid driftavbrott, samt volym för brandvattenförsörjning.

**LTA-system:** Tryckavloppssystem med många små pumpstationer (oftast en per fastighet) som trycker in avlopp på ett gemensamt ledningsnät. LTA står för lågtrycksavlopp. På engelska Low Pressure Sewer (LPS).

**Lågreservoar:** Lågt belägen reservoar som utgör utjämningsvolym för förbrukningsvariation och reservvolym vid driftavbrott, samt volym för brandvattenförsörjning. Distribution från reservoaren sker genom pumpning.

**Mätkampanj:** Loggning av tryck, nivåer och flöden, samt pumpdrift, som till skillnad från kontinuerlig mätning görs under en kortare period. ofta med portabla mätare.

**VAV P58:** Svenskt Vattens publikation P58 Tryckslag i VA-anläggningar.

**VAV P83:** Svenskt Vattens publikation P83 Allmänna Vattenledningsnät.

**P110:** Svenskt Vattens publikation P110 Avledning av dag-, drän- och spillvatten.

**P114:** Svenskt Vattens publikation P114 Distribution av dricksvatten.

**Randvillkor (Boundary conditions):** Grundförutsättningar vid simuleringar med hydraulisk modell.

**Råhet/Råhetstal:** Avser ekvivalent sandråhet, vilket är ett mått på en lednings invändiga ojämnheter och används för bestämning av friktionsförluster. En ledning med den ekvivalenta sandråheten 1,0 mm motsvaras av en ledning som invändigt är klädd med sandkorn med diametern 1,0 mm.

---

**Stationära förhållanden (Steady state):** Simulering i ett tidssteg med givna randvillkor. Flöden och tryck förändras inte över tid.

**Servisledning:** Ledning som förbinder fastighets vatteninstallation med i allmän VA-anläggning ingående distributionsledning eller, i undantagsfall, huvudledning.

**Statisk uppforderingshöjd:** Den fysiska höjd vattnet ska lyftas, till exempel skillnad mellan inkommande trycknivå vid en tryckstegringsstation och vattennivån i högzons-reservoaren dit vattnet ska pumpas. Den statiska uppforderingshöjden och friktionsförlusterna i ledningsnätet motsvarar tillsammans pumparnas totala tryckhöjning.

**Transient:** Ett svängningsförlopp med kort varaktighet.

**Tryck:** Nivåskillnaden mellan trycknivån och plushöjden för den aktuella ledningen eller objektet. Anges oftast i enheten mvp (meter vattenpelare) eller bar.

**Trycklinje:** Resulterande trycknivå längs flödesriktningen för en given ledningssträcka.

**Trycknivå:** Plushöjden för trycklinjen i en viss punkt i förhållande till höjdsystemets referensplan (oftast havsnivån). Anges i enheten m eller möh (meter över havet), ofta med prefixet +. Trycknivån är den plushöjden där en fri vattenyta skulle ställa in sig om det fanns en brunn eller motsvarande på ledningen.

**Tryckslag (Water hammer):** Snabb trycksvängning i ledningssystem till följd av plötslig ändring av strömningshastigheten.

**Tröghetsmoment:** En kropps tröghetsmoment är ett mått på det vridmoment som krävs för en given ändring per tidsenhet av kroppens rotationshastighet kring en given axel.

**Vattennätsmodell:** En hydraulisk modell över ett vattendistributionssystem inklusive ledningar, reservoarer, pumpar och ventiler.

**Ventilkaraktäristika:** Samband mellan tryckförluster och flöde genom en ventil.

**Utökad simulering (Extended period simulation):** Simulering under en utökad period där simuleringen görs i många tidssteg och resultaten från varje tidssteg utgör indata till nästa tidssteg.

---

# Del 1

## Vad är en hydraulisk modell och vad kan den användas till?

Denna del ger en översiktlig beskrivning av hydraulisk modellering och riktar sig i första hand till beslutsfattare och andra som behöver få en introduktion till vad hydraulisk modellering är och vad resultaten kan användas till.

---

# 1 Hydraulisk modellering

## 1.1 Bakgrund och syfte

För att förstå vår omvärld skapar vi oss modeller av den. Ju mer abstrakta objekt vi studerar desto större blir behovet av en begriplig modell. Vattentryck och flöden i ett ledningsnät kan vi inte observera med våra sinnen annat än i ett fåtal punkter i distributionssystemet och därför är det svårt att få någon samlad bild av dess funktion. Eftersom delarna i ett trycksatt system påverkar varandra och in- och utflöde varierar över dygnet och från dag till dag blir det även komplext att göra manuella beräkningar som ger en tillfredsställande förståelse. En hydraulisk modell gör på kort tid många passningsräkningar tills tryck och flöde är i balans i modellens ledningsnät. Beräkningar kan göras för många tidssteg efter varandra och beräkningsresultaten från ett tidssteg utgör indata till nästa beräkningssteg. Resultatet blir en simulering under en utökad period som visar hur tryck och flöden fördelar sig i ledningsnätet och varierar över tid.

Ingen beräkning eller modell blir bättre än den data som matas in i den. Det gäller dock att lägga sig på rätt nivå båda vad gäller geografisk omfattning och detaljeringsgrad. Det innebär att modellen ska göras tillräckligt bra för att, med god säkerhet, kunna svara på de aktuella frågeställningarna.

Hydraulisk modellering av trycksatta ledningsnät används främst för att studera dricksvattensystem men modellering är också ett effektivt verktyg för att studera eller dimensionera trycksatta avloppssystem där flera pumpstationer trycker in avloppsvatten på ett gemensamt trycksatt ledningssystem för vidare befordran i självfallssystem.

Kapitel 7 i Svenskt vattens publikation P114 ger en introduktion till hydraulisk modellering. Föreliggande rapport syftar till att beskriva olika typer av hydrauliska modeller av trycksatta system mer ingående, vilket underlag som krävs för att skapa dem samt vad de kan användas till. Det ges även förslag på arbetsmetodik för framtagande av hydrauliska modeller samt tips och instruktioner för hur olika detaljer bör beskrivas. Syftet är att skapa en gemensam grund för att höja effektiviteten och kvaliteten på arbetet med hydrauliska modeller. En viktig del är att förse beslutsfattare med rätt kunskap för att kunna beställa rätt modell för rätt ändamål. En annan del är att hjälpa modellören att lägga sitt arbete på rätt nivå vilket i förlängningen leder till bättre beslutsunderlag vid investeringar. Rapporten är uppdelad i tre delar där den första beskriver vad en modell är och vad den kan användas till. Del två riktar sig till beställare av modeller och ska vara en hjälp vid upphandling och beställning av en modell. Del tre innehåller riktlinjer och instruktioner till modellören som ska bygga upp och arbeta med modellen.

## 1.2 Modellering av trycksatta vattensystem

### 1.2.1 Användningsområden och värde av modellering

En hydraulisk modell är ett mycket effektivt verktyg som ger förståelse för ledningsnätets funktion och samspelet mellan pumpar, ventiler och reservoarer. Vi kan se hur systemet fungerar både vid normaldrift och vid extra hög belastning eller kritiska situationer. Modellen kan bland annat användas för att ge svar på följande frågor:

- Finns det trånga sektioner som orsakar kapacitetsproblem i ledningsnätet?
- Finns det kapacitet att förtäta eller exploatera i ett visst område?
- Finns det redundans om en ledning måste tas ur bruk?
- Hur lång tid räcker vattnet i reservoarerna om försörjningen från vattenverket slås ut?
- Vad blir effekterna av att öka eller minska ledningsdimensionen längs en sträcka?



- Hur förändras trycket i ledningsnätet om kapaciteten hos de matande pumparna ökas eller minskas?
- Vad blir effekterna av en stor läcka eller ett stort brandvattenuttag i en viss punkt i ledningsnätet?
- Hur gammalt blir vattnet i ledningsnätet innan det når abonnenterna i olika delar av systemet?
- Hur sprider sig en eventuell förorening i ledningsnätet och hur ska spolningsinsatser göras för att spola ut föroreningen ur ledningsnätet?
- Hur ska spolningar i ett dricksvattensystem göras för att erhålla bästa resultat?

Om tryck och flöden kontinuerligt mäts och loggas kan en modell även användas för att spåra orsaken till en plötslig förändring i tryck- och flödesfördelning. Med hjälp av simuleringar kan till exempel ett ungefärligt läge för en läcka tas fram. Vissa modellprogramvaror kan även vara uppkopplade mot mätare och kontinuerligt göra beräkningar av hur tryck och flöde kan förväntas variera och larma om en misstänkt läcka uppstår. Det här är ett område som troligen kommer växa kraftigt de närmsta åren i och med att artificiell intelligens utvecklas och implementeras i modelleringstekniken.

### 1.2.2 Underlag och uppbyggnad av en hydraulisk modell

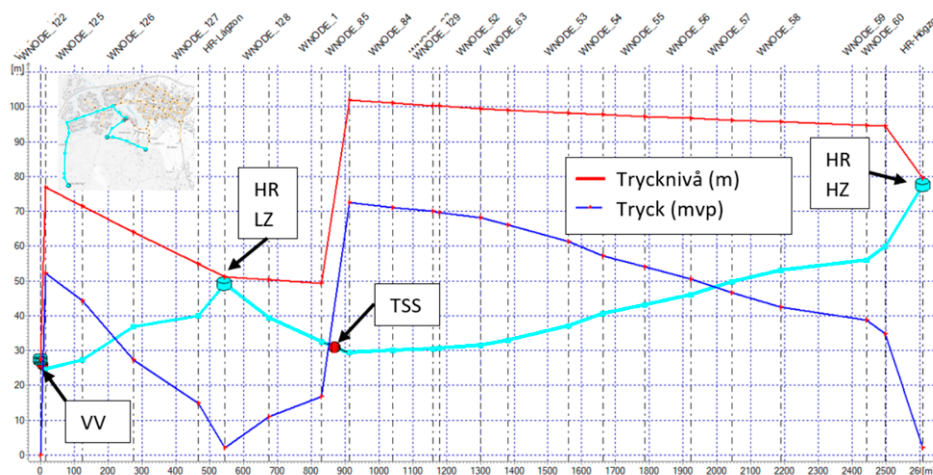
Uppbyggnaden av en hydraulisk modell medför en ordentlig genomgång av ledningsnätet, systemets funktion samt styrningar av pumpar och regleringar. Det innebär oftast att ledningsägaren får en bättre överblick över sitt system och att systemet blir bättre dokumenterat. Arbetet med att förbättra ledningsdatabasen och dokumentera reservoarer, pumpar i tryckstegringsstationer och regleringsventiler bör om möjligt göras innan modellarbetet påbörjas. På det viset kan mycket tid sparas under modellarbetet. I kapitel 2.3 redovisas vilket underlag som krävs för att upprätta en hydraulisk modell.

När modellen ska kalibreras krävs det mätdata. Ju fler punkter man mäter och loggar flöde och tryck i och ju högre tidsupplösning mätningarna har, desto noggrannare kan modellen kalibreras. Om ledningsägaren inte mäter och loggar flöde och tryck kontinuerligt i tillräckligt många strategiska punkter kan en mätkampanj genomföras med portabla tryckmätare och eventuellt även flödesmätare. Det ger dock mer att ha tillgång till längre mätserier med historiska data i hög upplösning. Det kan till exempel visa hur systemet beter sig vid extrem belastning som man troligen inte lyckas fånga vid en mätkampanj. Om ledningsnätet är sektionerat med permanenta flödesmätare kan utläckaget och flödesmönster beskrivas på ett bättre sätt i modellen men även lättare lokaliseras i det verkliga ledningsnätet.

### 1.2.3 Resultat från hydraulisk modellering

Modellberäkningar av trycksatta ledningsnät kan antingen göras för en viss tidpunkt med givna randvillkor, eller som en utökad simulering under ett antal timmar eller dagar.

Resultaten från en hydraulisk modell kan redovisas på flera olika sätt. Ett sätt är att visa tryck och/eller trycknivå i en profil längs en ledningssträcka, se exempel i Figur 1.1. En profil med trycknivå plottad visar tydligt hur trycklinjen sjunker, på grund av friktionsförlusterna i ledningarna, längs med vattnets väg från vattenverket till högre reservoarer. Där syns även att trycknivå höjs av tryckstegringsstationen. Profilen kan antingen visa en ögonblicksbild, som i Figur 1.1, eller högsta respektive lägsta värdet under en simulering. Det går även att visa tryckets variation över tid som en filmsekvens.

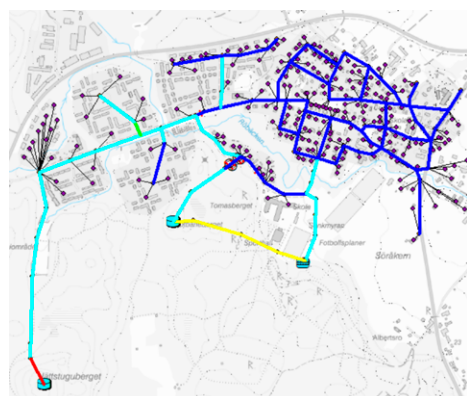


**Figur 1.1**

Exempel på redovisning av trycknivå och tryck längs en ledningssträcka vid en viss tidpunkt.

Om modellen används för att göra en simulering av en viss period kan det högsta och lägsta trycket i varje punkt under simuleringen visas i plan med en kartbakgrund. Det ger en tydlig bild av vilka delar av ledningsnätet som har för höga tryck och var det är troligt att abonnenterna kommer klaga på att trycket är lågt. På samma sätt kan högsta eller lägsta hastighet under simuleringen redovisas. Det går även att på samma sätt redovisa hur tryck och flöde fördelar sig i systemet vid en viss tidpunkt. Figur 1.2 visar exempel på redovisning av tryck och vattenhastighet från en simuleringsperiod.

#### Högsta vattenhastighet

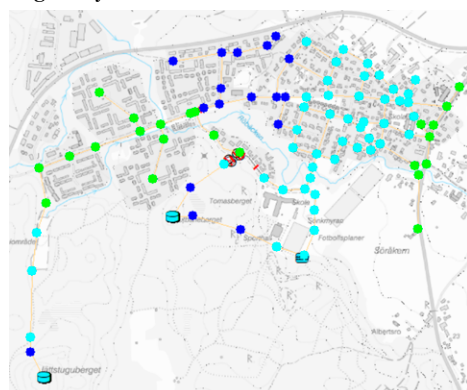


| Vattenhastighet (m/s) | Tryck (mvp)   |
|-----------------------|---------------|
| 0,000 - 0,4000        | 9,986 - 15,00 |
| 0,4001 - 0,8000       | 15,01 - 25,00 |
| 0,8001 - 1,200        | 25,01 - 50,00 |
| 1,201 - 1,600         | 50,01 - 70,00 |
| 1,601 - 2,100         | 70,01 - 100,0 |

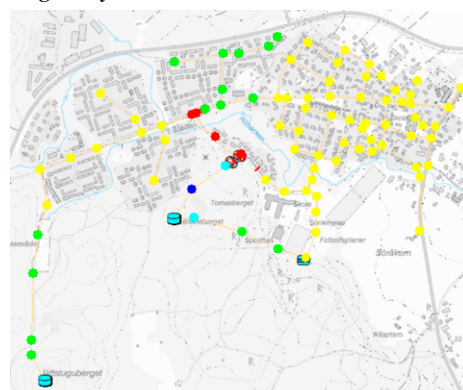
**Figur 1.2**

Exempel på grafisk redovisning av beräkningsresultat i plan.

#### Lägsta tryck



#### Högsta tryck



---

### 1.3 Arbetsgång vid hydraulisk modellering av vattensystem

Hur omfattande modellarbetet blir beror både på hur komplext systemet är och vad modellen ska kunna simulera. Att bygga en teoretisk modell för ett mindre tryckavloppssystem som ska dimensioneras innebär inte ett särskilt omfattande arbete medan en vattenmodell för en hel stad med många tryckzoner, reservoarer, tryckstegringar och tryckreduceringar kan bli väldigt omfattande. Kalibreringen av modellen kan också ta mycket tid om underlaget inte varit korrekt eller om systemet i verkligheten inte fungerar så som det är tänkt. Till exempel kan det visa sig att viktiga ventiler är stängda trots att de borde vara öppna eller att ledningar har fel dimension i underlaget.

I punktlistan nedan följer en arbetsgång som bör följas vid modelleringsarbete.

- Bestäm syfte och avgränsningar
- Datainsamling
- Modelluppbyggnad
- Test av modellen
- Mätning
- Kalibrering av modellen
- Modellanvändning

Innan arbetet med att bygga en modell påbörjas är det viktigt att slå fast vad modellen ska användas till så att den inte görs för enkel och då inte kan ge svar på de frågor man har. Grundprincipen bör vara att skapa en modell som kan användas för att svara på så många typer av frågeställningar som möjligt. Det innebär att systemet inte ska förenklas i onödan. Alla modeller innehåller förenklingar, till exempel tas servisledningar i stort sett aldrig med, men om modellen ska avgränsas ska det finnas goda argument för det. Det går ofta snabbare att ta med hela ledningsnätet än att sortera bort vissa ledningar. Det kan dock i vissa fall finnas anledning att begränsa modellen till en viss tryckzon eller att utelämna någon zon.

### 1.4 Modellering av trycksatta avloppssystem

Avloppssystemen i Sverige består till största delen självfallssystem, där vattnet rinner i delvis fyllda ledningar och kapaciteten främst styrs av rörets lutning och innerdiameter. De flesta avloppssystem innehåller även pumpstationer som leder bort vattnet från lågpunkter och mynnar i en ny självfallsledning på en högre nivå. Vanliga pumpstationer i ett avloppssystem modelleras normalt i de modelleringsprogram som finns för självfallssystem.

Det finns dock tryckavloppssystem där flera pumpstationer trycker in avloppsvatten i en gemensam tryckledning eller ett helt ledningsnät av trycksatta avloppsledningar. I ett sådant system kommer alla pumpar att påverka varandra och kapaciteten för en enskild pump blir beroende av hur många andra pumpar, och vilka pumpar, som är i drift samtidigt. När ett sådant system ska studeras görs det bäst i ett modellprogram för trycksatta system.

Det är ovanligt med trycksatta avloppssystem med många pumpstationer i de kommunala huvudledningsnäten för avlopp. Där brukar endast ett fåtal stationer trycka in på samma ledning. Det finns dock gott om bostadsområden, främst i kuperade småhusområden, där varje fastighet har en egen pumpstation som pumpar avloppet till ett gemensamt ledningsnät som mynnar i ett självfallssystem eller ett lokalt reningsverk.

Hydrauliska modeller över tryckavloppssystem används ofta för att dimensionera ledningarna, men kan även användas för att analysera störningar i systemen eller beräkna uppehållstiden i ledningarna. Uppehållstiden är avgörande för risken att svavelväte bildas i tryckledningarnas syrefattiga miljö.

---

## Del 2

# Anvisningar till beställare av modelluppdrag

Del 2 av rapporten riktar sig i första hand till beställare av hydrauliska modeller. Avsikten är att ge en djupare förståelse för vad en modell är, vad som skiljer olika typer av modeller åt, vad de olika modellerna kan användas till samt vilket underlag som krävs för att bygga upp en hydraulisk modell.

---

## 2 Att beställa hydrauliska modeller

### 2.1 Introduktion

När en hydraulisk modell ska upprättas är det viktigt att vara tydlig med vad ändamålet med modellen är eftersom det styr hur omfattande och hur detaljerad modellen ska byggas. En hydraulisk modell som byggs för att undersöka om ett dricksvattensystem har erforderlig kapacitet i ett specifikt område och en modell som byggs för att undersöka vad som behöver göras för att öka kapaciteten i huvudledningsnätet ställer olika krav på omfattning och detaljeringsgrad. Modelluppbyggnaden bör inleds med en diskussion där beställaren och modellören gemensamt slår fast modellens omfattning och detaljeringsgrad. Det finns dock i stort sett aldrig anledning att förenkla eller avgränsa en modell om det finns underlag och systemet inte är mycket stort.

Redovisningen av resultaten beror också på vilka frågeställningar som är aktuella. Det bör därför klargöras vid beställningen. För att underlätta utvärdering av olika anbud vid en upphandling av en hydraulisk modellering kan det också vara bra att specificera vilken typ av redovisning som önskas. Det kan till exempel vara om lägsta och högsta tryck för samtliga punkter ska redovisas i plan på kartunderlag eller vilka scenarier som ska simuleras. Det förutsätter dock att beställaren har viss kännedom om arbete med modellering.

### 2.2 Kvalitetssäkring och dokumentation

För att säkerställa kvaliteten på modellarbetet ska allt arbete granskas av en erfaren modellör. Granskningen bör göras i flera steg under arbetets gång. En granskning bör göras när underlaget är bearbetat och importen ska göras. Nästa granskningssteg bör ske när modellen är färdigbyggd för att se att beskrivningar av modellens funktioner är gjorda på ett lämpligt sätt. Den sista granskningen bör göras efter kalibreringen då flöden och tryck ska verifieras så att modellens resultat överensstämmer med uppmätta värden.

För att det ska gå lätt att granska modellarbetet och sätta sig in i modellens funktion för en annan modellör än den som byggt upp modellen ska allt arbete med modellen föras in i en modelldokumentation. Dokumentationen ska sedan följa modellen och uppdateras och justeras allteftersom modellen används och utvecklas.

Kvalitetssäkring och modelldokumentation beskrivs mer ingående i kapitel 13.

### 2.3 Upphandling av modeller

Om en konsult ska handlas upp för att göra modelluppbyggnaden är det som alltid viktigt att ange mängder så att arbetet blir kalkylerbart och anbudet blir jämförbara. Det är även viktigt att ange vilken kvalitet på underlaget som konsulten kan förvänta sig. För att förstå vilken detaljeringsgrad modellen måste ha är det viktigt att konsulten får veta vad modellen är tänkt att användas till.

Om modellens omfattning, antalet ingående objekt och datakvaliteten kan specificeras kan modellupphandlingen eventuellt göras med fast pris för modelluppbyggnad och flödesbalans. Det är dock vanligt att delar av underlaget har en lägre kvalitet än förväntat vilket medför extra arbete utöver det som offererats. Rekommendationen är därför att handla upp allt modellarbete mot rörligt arvode.

---

Om modellägaren inte har egen personal som arbetar heltid med hydrauliska modeller är det lämpligt att handla upp förvaltning av modellerna. Uppdraget kan formuleras som ett ramavtal som sträcker sig över en längre period och innefattar att konsulten ska initiera genomgång och uppdatering av de modeller som berörs av förändringar som har gjorts i systemet. I detta ingår även att initiera ny mätperiod och kalibrering med ett intervall som anges i avtalet. För att säkerställa att personal med rätt kompetens handlas upp bör stor tonvikt läggas på erfarenhet av modellarbete vid utvärderingen av anbud. Eftersom det är stor skillnad mellan arbetet med modeller över trycksatta ledningsnät och modeller över självfallsnät är det viktigt att en konsult kan uppvisa goda referenser för båda typerna om förvaltningen av alla modeller upphandlas tillsammans. Ett alternativ kan vara att handla upp trycksatta modeller för sig och självfallsmodeller för sig.

### **2.3.1 Förslag på text vid upphandling av vattennätsmodeller**

Nedan följer ett förslag på hur en text i ett förfrågningsunderlag kan se ut.

Uppdraget omfattar uppbyggnad av en hydraulisk modell över vattennätet i X.

Modellen upprättas med syftet att kontrollera effekterna av planerade exploateringar.

Alt. Modellen ska användas för att lokalisera orsaken till att vissa delar av ledningsnätet har lägre tryck än förväntat samt till att testa alternativa åtgärder.

Alt. Modellen ska användas för att upprätta en spolplan för ledningsnätet. Modellen ska omfatta X tryckzoner.

En avgränsning kommer dock göras vad gäller ledningsdimension. Ledningar som inte ingår i någon loop och som har en innerdiameter mindre än X mm ska rensas bort ur underlaget.

Alt. Beslut om vilka dimensioner som ska tas med i modellen ska fattas i samråd med beställaren.

Beställaren tillhandahåller följande underlag för uppbyggnad av modellen:

- Ledningsdatabas i shapeformat med samtliga attribut.
- Vattenförbrukning från debiteringssystemet (årsförbrukning) som koordinatsatta förbrukningar fördelade på brukartyper alt. Vattenförbrukning från debiteringssystemet (årsförbrukning) med fastighetsbeteckning och adress, fördelade på brukartyper.
- Höjdmodell (NNH) för vattennätets utbredning
- Ritningar och beskrivningar av samtliga reservoarer inklusive nivåer och geometri
- Ritningar och beskrivningar för samtliga tryckstegringsstationer inklusive pumpkapacitet och styrningar
- Uppgifter om styrningar och regleringsfunktioner avseende flöden via motorventiler och fasta ventiler.
- Uppgifter om styrningar och regleringstryck för samtliga tryckregleringar.
- 2 veckors data med flöden (X punkter) och tryck (X punkter) samt nivåer i X reservoarer, hämtade från styr- och övervakningssystemet. Tidsupplösningen är 2 min.
- 3 års data för vattenproduktion hämtade från styr- och övervakningssystemet. Tidsupplösning 1 dygn.

Vattennätet består av följande komponenter som ska ingå i modellen:

- X ledningar (inkl. små dimensioner) varav X ledningar saknar uppgift om innerdiameter och material
- X reservoarer
- X tryckstegringsstationer
- X flödesregleringsventiler
- X tryckreduceringar
- X abonnenter varav X är storförbrukare

---

Alla objekt i modellen ska namnges så att de kan kopplas till ursprungsdata och lätt uppdateras med nya data i framtiden.

Ledningarna i modellen ska placeras i marknivå.

I uppdraget ingår även att göra en tryckloggning i X punkter på ledningsnätet, samt nattmätningar med brandposttappningar i X punkter. Antalet mätpunkter och tappningspunkter kan komma att ändras efter samråd mellan konsulten och beställaren. Konsulten ska tillhandahålla all utrustning som krävs för mätningarna. Beställaren ombesörjer öppning och stängning av erforderliga ventiler i samband med mätningarna.

Uppdraget omfattar även att göra en flödesbalans och kalibrera modellen med avseende på läckage, förbrukningsmönster och tryckförluster mot loggade tryck och flöden.

Modellen ska kvalitetssäkras och dokumenteras enligt kapitel 13 i denna rapport.

## 2.4 Datasäkerhet

Då distributionssystemet för dricksvatten är säkerhetsklassat får information om vattenledningsnätet inte överföras via mejl. Det finns säkra överföringstjänster som bör användas i stället. Ett alternativ är också att överlämna till exempel ett USB-minne eller en bärbar hårddisk, med den säkerhetsklassade informationen. Det är i så fall viktigt att all data inte bara raderas utan även skrivs över efter att det använts.

Samma dilemma uppstår när den färdiga modellen och resultatfilerna ska levereras. Observera att den säkerhetsklassade informationen även finns med i resultatfilerna och planplottar som redovisas i GIS.

Om modellen byggs upp inom den egna organisationen är problemet att sprida informationen utan att obehöriga kommer åt den mindre. Det är dock även här viktigt att aldrig skicka modellen eller resultatfiler via mejl. Resultaten av modelleringen ska dock spridas inom organisationen så att den kommer till nytta.

## 2.5 Förvaltning av modeller

För att modellen ska vara relevant när den behövs måste den vara uppdaterad vilket därför bör göras med jämna mellanrum. Ett lämpligt intervall för att gå igenom och uppdatera förbrukningar, pumpar och ledningsdata kan vara en gång per år eller en gång vart annat år beroende på hur mycket arbeten som pågår med att förnya ledningsnätet eller förtäta bebyggelsen inom det område som omfattas av modellen. En ny flödesbalans med nya förbrukningsmönster och kontroll av trycket i utvalda punkter bör göras minst vart 5:e år.

Omläggning av enskilda ledningar har oftast inte så stor påverkan på modellresultatet. Det har däremot nya huvudledningar eller överföringsledningar och stora ombyggnader av ledningsnätet. Även byte av pumpar eller förändrad styrning får direkt påverkan och är viktigare att uppdatera ofta.

När en hydraulisk modell ska uppdateras är det mycket viktigt att beställare och modellör är överens om vad som ska göras. Att uppdatera en modell kan betyda olika saker. I ett fall kan det vara att lägga till de delar av ledningsnätet som har byggts ut sedan modellen senast användes. I ett annat fall kan det betyda att modellen ska gås igenom och alla ledningars dimensioner och material ska kontrolleras mot databasen. Om modellen är gammal kan den vara byggd utifrån underlag från en databas som innehöll många förenklingar och mycket fel. Det kan tänkas att vattennätet driftas på ett annat sätt än vad som var fallet när modellen skapades. Det är därför lämpligt att gå igenom styrningarna av tryckstegringar och tryckregleringar.

---

Om modellen är byggd med mycket förenklingar och ledningsdatabasen har förbättrats sedan modellen skapades ska man inte vara rädd för att börja om från början och bygga upp en ny modell. Det går ofta fortare än att leta igenom den befintliga modellen efter fel och brister i ledningsnätet. Det kan dock vara värt att spara reservoarer och andra anläggningar om de är korrekt beskrivna i den befintliga modellen.

Modelluppdateringen ska inledas med ett möte mellan den som ska uppdatera modellen och den personal som ansvarar för systemet. Det är viktigt att få med driftpersonalen vid modelluppdateringen. De har ofta viktig detaljinformation om ledningsomläggningar eller pumpbyten som inte har dokumenterats.



---

## 3 Modeller för olika syften

### 3.1 Principer för en hydraulisk modell

En hydraulisk modell av ett trycksatt system består av noder och länkar. I noderna kan en trycknivå simuleras och länkarna kan transportera ett flöde.

Noder representerar knutpunkter och reservoarer. Reservoarnoder kan även innehålla en volym.

Länkar, till exempel ledningar, pumpar och ventiler, kan vara öppna eller stängda. När vatten flödar från högre trycknivåer till lägre genom ledningar och ventiler uppstår friktionsförluster som gör att trycknivån sjunker längs sträckan. Även tryckstegringar och tryckreduceringar representeras av länkar som höjer respektive sänker trycknivån.

Flödet ut ur modellen utgörs av förbrukningar och utläckage som kopplas till noderna. Flödet ut ur modellen kan också vara uttag till andra kommuner eller till andra tryckzoner om distributionssystemet delats upp i separata modeller. Förbrukarna kan ges en dygnsvariation som gör att förbrukningen varierar från timme till timme och från dag till dag. Pumpar och ventiler styrs normalt med regler av typen ”öppna om nivån i reservoar 1 är lägre än 2,00 mvp”.

### 3.2 Beräkningar i ett eller flera tidssteg

Vid simuleringar av tryck och flöden med en hydraulisk modell över ett trycksatt system kan beräkningar göras på två sätt. Det ena är att studera ett enda ögonblick. Då passningsräknar modellen utifrån de givna randvillkoren, i form av trycknivåer och flöden, tills systemet är i jämvikt (stationära förhållanden). Resultaten visar då till exempel tryck och flöden för just de angivna förhållandena. Alternativt görs motsvarande passningsräkning för många tidssteg efter varandra där flöden och reservoarnivåer med mera påverkas av vad som hänt i det förra tidssteget. Resultatet blir då en tidsserie där till exempel tryck och flöde redovisas för varje tidssteg.

Vid transientberäkningar (tryckslagsberäkningar) beräknas de krafter som uppstår när de stationära förhållandena plötsligt ändras. Det görs genom simuleringar med väldigt korta tidssteg.

Hydraulisk modellering av trycksatta vatten- och avloppssystem kan användas i olika syften och i olika skeden. I följande kapitel beskrivs olika användningsområden och vilka krav som ställs på modeller vid olika frågeställningar.

### 3.3 Modellavgränsning

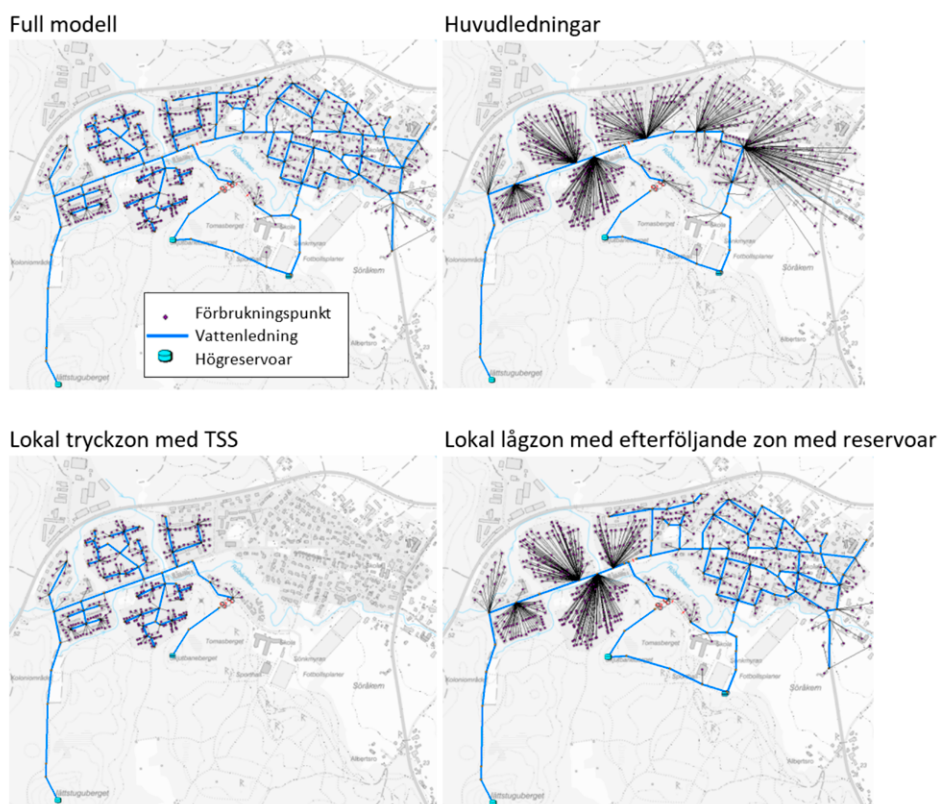
Som redan nämnts är det normala att en hydraulisk modell byggs för hela distributions-systemet. Modellens omfattning och detaljeringsgrad kan dock i vissa fall påverkas av vad modellen ska användas till. Begränsningar i modellens detaljeringsgrad kan även styras av hur mycket tillförlitligt data det finns i underlaget. Finns det inga tillförlitliga ledningsdata för ett område går det inte att bygga en bra modell för den delen av lednings-nätet. Är det fråga om ett hydrauliskt avgränsat område, till exempel en tryckzon, kan ledningsnätet eventuellt utelämnas där. Om det inte finns någon tryckmässig avgränsning måste antaganden om ledningsnätets egenskaper göras. Om så är fallet måste det tydligt anges i dokumentation och resultatrapporter.

I en modell som endast ska användas till att studera vad som händer i huvudled-ningarna för ett stort system eller i en överföringsledning så kan modellen avgränsas.

All förbrukning och allt läckage måste dock ingå i modellen. Det är också viktigt att ta med alla reservoarer eftersom de utjämnar dygnsvariationen. Figur 3.1 visar exempel på olika modellavgränsningar.

Om förhållanden i ett område eller en enskild tryckzon ska studeras räcker det ofta att ta med ledningsnätet för det aktuella området i modellen. Det förutsätter dock att trycket vid matningen till området är känt, till exempel vid en tryckstegringsstation. Trycknivån i stationen eller huvudledningen sätts då som randvillkor i modellens startpunkt. Om förbrukningen bedöms kunna påverka tryckförhållandena i startpunkten måste hänsyn tas till det i modellen. Distributionsledningarna för övriga områden behöver inte tas med utan endast förbrukningarna. På samma sätt måste tryckstegringsstationen tas med i modellen om det finns misstankar om att den inte kan hålla tillräckligt tryck under perioder med höga flöden.

Om det finns en tryckzon med en reservoar som matas från det område som ska studeras måste både reservoaren och förbrukningarna för den tryckzonen tas med. Distributionsnätet kan dock slopas.



**Figur 3.1**

Avgränsningar av modellen.

Den normala avgränsningen av en hydraulisk modell är att inte ta med servisledningar, i övrigt tar det oftast mer tid att rensa bort ledningar under en viss dimension än det sparar. Dessutom bör alla ledningar, även i klena dimensioner, som ingår i ett cirkulationsnät alltid tas med i modellen. Antalet ledningar i modellen har liten påverkan hur beräkningsmässigt tung den blir, däremot kan komplexa styrningar av ventiler och pumpar med många villkor ge den effekten. Det kan därför finnas fördelar att göra förenklingar av dessa så länge funktionen inte förlorar sin likhet med verkligheten.

---

### 3.4 Modellering av befintliga system

Hydraulisk modellering är ett mycket bra verktyg för att undersöka hur flödes- och trycksituationen är i vattennätet. Det går även att undersöka vad effekterna blir av olika förändringar i systemet. Man brukar vilja undersöka om systemet har tillräcklig kapacitet, god redundans och om omsättningen är bra.

Nedan listas ett antal vanliga frågeställningar som en hydraulisk modell kan ge svar på.

- Vad blir effekterna av att förbrukningen ökar till följd av ökad befolkningsmängd?
- Vad blir effekterna för befintlig bebyggelse om nya bostadsområden och verksamheter ansluts?
- Vad blir konsekvenserna av olika typer av driftavbrott?
- Hur många timmar kan huvudmatningen från vattenverket vara stängd?
- Hur lång tid tar det att återfå normalnivåer i reservoarerna efter ett stort avbrott?
- Finns det områden eller ledningar med dålig omsättning?
- Finns det områden som har mycket högt eller lågt tryck under delar av dygnet?
- Var finns de trånga sektionerna i systemet?
- Hur kan störning minimeras vid arbeten på ledningsnätet?
- Vilken kapacitet har brandposterna i systemet och hur påverkar ett brandpostuttag trycket i det övriga systemet?
- Kan vi leverera sprinklervatten med tillräckligt flöde och tryck?
- Var ska vi placera våra vattenkiosker för att få god kapacitet och inte störa resten av systemet?

Genom simuleringar kan en god bild skapas av systemets känslighet för störningar och förändringar samt vilka åtgärder som krävs för att nå en tillräcklig säkerhetsnivå. Modellresultaten är också ett bra underlag när en prioriteringsordning för olika åtgärder ska skapas eftersom det går att se effekten av respektive åtgärd. Sedan kan en jämförelse av vilken åtgärd som ger mest valuta för pengarna göras.

Med hjälp av modellen kan olika sätt att styra nivåerna i reservoarerna testas till exempel för att se hur omsättningen kan optimeras utan att tillgången på brandvatten äventyras. Det går även att testa sig fram till det mest energieffektiva sättet att styra pumpar mot nivån i en reservoar.

Modellen är ett utmärkt verktyg för att undersöka om ledningsnätet med enkla åtgärder kan driftas på ett effektivare sätt eller om det krävs stora insatser för att förbättra funktionen. Det går att undersöka effekterna av att lägga till eller ta bort en reservoar samt att dimensionera reservoarer och tryckstegringsstationer. Vidare kan effekterna av att mata systemet från ett annat håll och vilka förändringar som krävs för att få en god funktion i hela ledningsnätet kontrolleras.

### 3.5 Vattenkvalitetsberäkningar

När spridning av en eventuell förorening i ett ledningsnät ska studeras, eller om blandningen av vatten från olika vattenverk ska undersökas, görs det bäst med en vattenkvalitetsberäkning i en hydraulisk modell. Det går även att undersöka vattnets omsättning och uppehållstid.

En spridningssimulering och en beräkning av vattnets omsättning görs på samma sätt. Det vatten som matas in i systemet ges en digital märkning för respektive inmatningspunkt och spridningen av vatten med olika märkning kan sedan studeras. På det viset illustreras spridningen av olika vatten i ledningsnätet samtidigt som det går att se hur många timmar det tar innan hela ledningsnätet har fyllts på med ”nytt” vatten.

---

I en hydraulisk modell går det även att simulera spridning, koncentration och nedbrytning av kemikalier eller biologisk tillväxt. Det är dock beräkningar som kräver indata med hög noggrannhet som till exempel tillväxt- och nedbrytningshastighet. Om det saknas tillförlitliga uppgifter blir beräkningsresultaten missvisande.

En analys som är enkel att genomföra är att beräkna vattnets "ålder". Dvs hur lång tid som vattnet har uppehållit sig i systemet. Det går även att ge vatten i reservoarer en initialålder och ange reservoarens blandningsförhållanden. Det går dock inte att generellt säga när ett vatten blir för gammalt, men det handlar aldrig om timmar utan snarare om dygn eller veckor. Det är viktigt att påpeka att lång uppehållstid i ledningsnätet inte är liktydigt med dålig vattenkvalitet även om det finns en ökad risk för kvalitetsförsämring om vattnet står stilla i en ledning under längre perioder. Om det finns områden med kända kvalitetsproblem är beräkning av uppehållstid ett bra verktyg för att jämföra effekterna av olika åtgärder. Simulering av uppehållstid kan även ge indikationer på var och när vattenprover bör tas.

### **3.6 Simulering av krisscenarier**

När vattenförsörjning vid en krissituation diskuteras är det lätt att förbise egenskaper i vattennätet som gör att funktionen vid en krisförsörjning inte blir som det var tänkt. Vid kraftig reduktion av kapaciteten i vattenförsörjningen kan ett tänkbart scenario vara att endast försörja de allra viktigaste samhällsfunktionerna med vatten från ledningsnätet medan övriga abonnenter försörjs med nödvatten från tankar.

En hydraulisk modell kan användas för att se vilken kapacitet som krävs i vattenverket för att kunna försörja de önskade samhällsfunktionerna. Det går till exempel att undersöka hur stor del av ledningsnätet som måste stängas av för att erhålla önskad effekt eller vad effekten blir om till exempel ett sjukhus ska försörjas med vatten från en lägre tryckzon än normalt.

### **3.7 Dimensionering av ledningssystem i nya områden**

Vid dimensionering av ett nytt vattenledningsnät är det lämpligt att kontrollera att erforderligt tryck uppnås i hela området vid hög belastning, till exempel brandvattenuttag. Det kan även vara intressant att kontrollera att trycket, vid låg förbrukning, inte blir för högt i låga delar av ett ledningsnät i ett kuperat område. Behovet av hydraulisk modellering är extra stort i cirkulationsnät. Nya vattenledningar dimensioneras ofta genom handberäkningar där en ledningssträcka dimensioneras åt gången. Genom simuleringar i en hydraulisk modell kan effekterna av att ledningarna i nätverket samverkar illustreras. Det kan leda till att mindre dimensioner kan användas vilket ger större möjlighet att uppfylla rekommendationerna i P114 om lägsta vattenhastighet.

En modell kan även visa om det finns ledningar i cirkulationsnät där vattnet kommer få dålig omsättning och därmed riskera att få dålig kvalitet. Om så är fallet kan modellen användas för att prova olika åtgärder för att öka omsättningen.

### **3.8 Realtidssimuleringar och artificiell intelligens**

När en hydraulisk modell över ett vattenledningsnät har byggts upp och kalibrerats kan den kopplas samman med styr- och övervakningssystemen så att simuleringar kan göras kontinuerligt i realtid. Resultat från modellen kan sedan användas för optimering och automatisering av driften i ledningsnätet.

---

En tillämpning av realtidssimuleringar kan vara att, på ett tidigt stadium, lokalisera läckor på ett automatiserat sätt. För att det ska kunna göras effektivt krävs dock att det finns tillräckligt många uppkopplade flödesmätare och tryckmätare i ledningsnätet.

En förutsättning för att realtidssimulering ska vara meningsfull är att modellen beskriver det fysiska vattennätet korrekt. Om en eller flera ventiler har stängts i verkligheten utan att modellen justerats kommer simuleringresultaten bli felaktiga och i värsta fall bidra till att driftens effektivitet försämras i stället för att den optimeras.

I takt med att antalet mätare i vattenledningsnäten blir fler så ökar möjligheterna för användning av realtidssimulering och artificiell intelligens (AI). Här kommer utvecklingen troligen gå snabbt de närmaste åren. Inom kort kommer vi troligen se modeller som till exempel på ett effektivt sätt kan kalibrera sig själva.

I avsnitt 7.1.4 och 7.5.8 i P114 beskrivs realtidssimuleringar mer ingående.

### 3.9 Transientberäkningar

Vid hastiga flödesförändringar i ett ledningssystem uppstår transienta förlopp, även kallat tryckslag. En tryckvåg genereras vid platsen för den hastiga förändringen, till exempel en pump som stannar eller stoppar, en ventil som öppnar eller stänger snabbt. Tryckvågen rör sig utefter ledningen och reflekteras mot ändpunkten vilket till exempel kan vara en reservoar eller ett utlopp. Tryckvågens utbredningshastighet beror av ledningsmaterialet. Ju hårdare material desto högre utbredningshastighet. Tryckvågens amplitud är proportionell mot tryckvågens utbredningshastighet och flödeshastigheten. Det är tryckvågens amplitud som ger högsta och lägsta tryck. Det höga trycket kan medföra skador på ledning eller i installationer. Om det låga trycket hamnar på minussidan motsvarar detta undertryck som kan orsaka skador och insugning av luft eller vatten. I extrema situationer kan trycket sjunka ända ner till vakuum.

Med varvtalsreglerade pumpar och långsammanövrerade ventiler minskar risken för skadliga tryckvariationer i den dagliga driften. Tryckslag kan fortfarande uppstå vid plötsliga driftavbrott, till exempel vid strömavbrott. Det är också den situationen som blir dimensionerande för utformning av tryckslagsreducerande åtgärder. Den mest robusta metoden är att installera en tryckklocka i anslutning till platsen där tryckslaget genereras. En tryckklocka begränsar både låga och höga tryck. En säkerhetsventil kan släppa ut vatten vid övertryck och en vakuumventil kan suga in luft för att begränsa undertryck. Valet av metod för att begränsa tryckslag påverkar vilket underhåll som krävs och vad effekterna blir när de träder i funktion.

En riktig lärobok i tryckslag finns i form av publikationen VAV P58. Här redogörs för både fysikaliskt händelseförlopp, åtgärder och manuella beräkningsmetoder. Med hjälp av en beräkningsmodell kan mer eller mindre avancerade beräkningar göras för att illustrera tryckvariationerna och studera effekten av tryckslagsbegränsande åtgärder.

### 3.10 Dimensionering av tryckavloppssystem

En hydraulisk modell är ett bra verktyg för att studera hur ett tryckavloppssystem, där flera pumpstationer trycker in på samma huvudledning, fungerar. Det gäller både LTA-system och system med större pumpstationer. Vid dimensioneringskontroll av ett projekterat system måste modellen göras som en helt teoretisk modell baserad på erfarenhetsvärden och underlag från pumpleverantörer. I modellen kan vattenhastigheter, tryck och uppehållstider simuleras för att undersöka om systemet kommer fungera som önskat. Det går att kontrollera om vattenhastigheten uppnår självrensningshastighet tillräckligt ofta och om uppehållstiden blir så lång att man kan anta att det finns risk för svavelvätebildning i systemet. Resultaten visar även om det finns någon pump i systemet

---

som kommer få problem att tömma sin sump på grund av att andra pumpar med mer gynnsam placering går samtidigt. Det går även att se vilka stationer som ligger så till att det finns risk för hävertverkan så att stationerna måste förses med hävertbrytande ventiler för att säkerställa systemets funktion.

### 3.11 Analys av befintliga tryckavloppssystem

När det uppstår återkommande driftproblem i ett LTA-system eller ett tryckavloppssystem med flera vanliga pumpstationer bör en hydraulisk modell byggas över systemet för att undersöka om systemet är korrekt dimensionerat och har en optimal drift. Problem som kan undersökas är:

- återkommande proppbildning
- långa gångtider för pumparna
- återkommande ledningsbrott
- tryckslag i systemet
- problem med dålig lukt vid stationerna eller trycksläppspunkten

Dämda ledningar, dykarledningar och enkla tryckledningar från pumpstationer kan normalt hanteras i modellprogram som är framtagna för att modellera självfallssystem. Många modellprogram utvecklade för självfallssystem har dock begränsningar i att modellera system där flera pumpstationer trycker in på samma tryckledning. Om simuleringen görs med ett program som är anpassat för trycksatta system blir beräkningarna stabilare än om den görs med ett program för modellering av självfallssystem. Det går dock inte att på ett enkelt sätt belasta tryckavloppssystemet med regnberoende flöden i ett modelleringsprogram för vattendistribution. Om det till exempel är bräddberäkningar som ska göras är det bättre att göra modellering i ett modelleringsprogram för självfallssystem.

---

## 4 Uppbyggnad av modeller

### 4.1 Uppbyggnad av vattennätsmodell

Det är viktigt att komma ihåg att ingen modell är bättre än den indata som legat till grund för modellen. Det gäller både för underlag som ledningsdimensioner, reservoarvolymer och pumpkapaciteter samt för annan indata som förbrukningsmönster och styrningar. Det är därför viktigt att en vattennätsmodell över ett befintligt ledningsnät kalibreras mot flödesmätningar, tryckmätningar och reservoarnivåer. Många styr- och övervakningssystem innehåller stora mängder med högupplöst data som kan användas vid modellering. Ju mer data som finns att tillgå desto noggrannare kan modellen utformas. Mätdata används för att upprätta en flödesbalans i syfte att ta fram förbrukningsmönster och utläckage för olika områden samt för att korrekt styra pumpar och ventiler. Det är dock viktigt att modellens förbrukning kalibreras mot en period som är representativ för de förhållanden som ska studeras. Mätning och kalibrering behandlas utförligare i kapitel 11.

#### 4.1.1 Randvillkor

Randvillkor är de yttre omständigheter som bestämmer förutsättningarna för en beräkning eller en simulering. Underlag för randvillkor vid nulägesmodellering med en vattennätsmodellering kan oftast läsas ut ur styr- och övervakningssystem. Vid simuleringar av ännu inte byggda system måste randvillkoren anges.

För att en simulering ska bli korrekt måste modellens randvillkor vara rätt för den situation som ska simuleras. Vilka randvillkor som måste läggas in i modellen beror på hur modellen har avgränsats vid uppbyggnaden och på vilken typ av simulering som ska göras. I modellen måste alltid randvillkor för trycknivå anges i minst en punkt. Om modellen börjar där huvudledningarna går ut från vattenverket eller där en överföringsledning kommer in i ett distributionsnät blir trycknivån i första noden ett randvillkor. Om modellen även omfattar distributionspumparna i vattenverket så blir trycknivån före pumparna randvillkoret.

Flödet ut ur modellen får också ses som ett randvillkor även om det varierar med tiden. Det är viktigt att förbrukningen och utläckaget ur ledningsnätet blir korrekt beskrivet eftersom det kommer styra vattenflödet i modellen som i sin tur tillsammans med antaganden om ledningarnas råhet styr vilka tryckförluster som uppstår i ledningarna i modellen.

Vid simulering av brandvattenuttag blir det uttagna flödet eller det lägsta tillåtna trycket i uttagspunkten också ett randvillkor.

Om en simulering görs som en beräkning med stationära förhållanden, se kapitel 3.2, är det även viktigt att vattennivåerna i alla högreservoarer är korrekta för den tidpunkt då simuleringen görs. Om de är för högt satta kommer modellen överskatta systemets tryck. I en simulering under en utökad period beräknas nivåerna i reservoarerna i varje tidssteg. Resultaten från föregående beräkning utgör randvillkor för nästa beräkning.

Vid simulering av tryckavloppssystem utgör trycksläppspunktens trycknivå och tillrinningen till stationerna randvillkor för modellen.

#### 4.1.2 Indata som behövs för att bygga en modell

För att kunna bygga en modell krävs underlag med information om ledningsnätet och anläggningarna i systemet, både geografisk information och egenskaper för de ingående objekten. Som med all geografisk information är det viktigt att veta i vilket koordinatsystem och höjdsystem som data är angivna.

Observera att vattenledningsnät och dess anläggningar klassas som skyddsobjekt.

---

Det innebär att information om ledningsdata mm måste överföras på ett säkert sätt, se kapitel 2.4.

I Bilaga A redovisas en sammanställning av den indata som krävs för att bygga upp en vattenmodell. Där redovisas även sådan data som är önskvärd för att underlätta modellarbetet samt förbättrar kvaliteten på modellen.

#### **4.1.3 Ledningsnätet**

I normalfallet finns det en ledningsdatabas som utöver geografisk information om ledningarna även innehåller attribut som diameter, material och anläggningsår. I modellen anges normalt ledningarnas innerdiameter och råhetstal. I databasen finns ofta information om innerdiameter och/eller ytterdiameter. Det kan även vara blandat eftersom dimension för plaströr av tradition anges som ytterdiameter medan järnrördimensioner anges som innerdiameter. Om material och dimension är angivet kan innerdiametern tas fram. Ur information om material, och eventuellt även anläggningsår, kan antaganden om råhet göras. Råhetstalet kan dock variera mycket vilket är en viktig orsak till att modellen måste kalibreras för att vara tillförlitlig. Den information som är viktigast att få korrekt är dock ledningarnas geometri och dimensioner.

I de fall då det saknas en ordentlig ledningsdatabas måste underlaget hämtas från ritningar eller annan dokumentation vilket är betydligt mer tidskrävande.

För att kunna beräkna trycket i systemets olika delar är det nödvändigt att plushöjd anges för varje nod i modellen. Eftersom ledningsnivåer för vattenledningar i stort sett aldrig finns i ledningsdatabasen hämtas underlag normalt från någon databas över marknivåer, till exempel nationella höjddatabasen (NNH). Det blir allt vanligare att kommunerna gör egna flygskanningar av tätorterna med högre upplösning än NNH och då kan det användas i stället. När marknivån lagts in i modellen kan ledningsnätet antingen ges samma nivå som marken eller en nivå på ett visst djup under marken. Om ledningarna ges marknivåer kan trycket över markytan läsas av direkt i resultatfilerna. Om det i stället är trycket i själva ledningen som är intressant bör en mer korrekt nivå eftersträvas i modellen.

#### **4.1.4 Anläggningar**

Distributionssystemets anläggningar, så som reservoarer, tryckstegringar och tryckregleringar ska läggas in i modellen. Koordinater för anläggningarna går oftast att hämta ur ledningsdatabasen där de brukar finnas med som punkter. Om det inte finns kan de läggas in för hand och det räcker att de ritas in i modellen med meternoggrannhet. Anläggningarnas egenskaper som pumpkurvor eller pumpkapacitet, geometri för reservoarer samt regleringstryck och styrfunktioner måste läggas in för respektive objekt. Underlag finns förhoppningsvis i ledningsägarens arkiv. Det är dock inte ovanligt att dokumentation helt saknas när det gäller äldre anläggningar i mindre vattennät. Regleringstryck för ventiler samt normal nivåvariation i reservoarer kan ofta hämtas ur styr- och övervakningssystemet. Det är viktigt att trycknivån efter tryckstegringar och tryckregleringar samt vattennivåer i reservoarer beskrivs korrekt eftersom de nivåerna ligger till grund för alla beräkningar.

#### **4.1.5 Förbrukningar och mönster**

I modellen måste utflödet ur vattennätet beskrivas. Det kan delas in i tre kategorier:

- Debiterad vattenförbrukning (inkl. leverans till andra kommuner)
- Icke debiterad vattenförbrukning
- Utläcke

Den debiterade vattenförbrukningen läggs oftast in som förbrukningspunkter. Underlaget hämtats som årsförbrukning från debiteringssystemet och koordinatsätts med hjälp av adress eller fastighetsbeteckning. Det ger en mycket bra bild av den normala

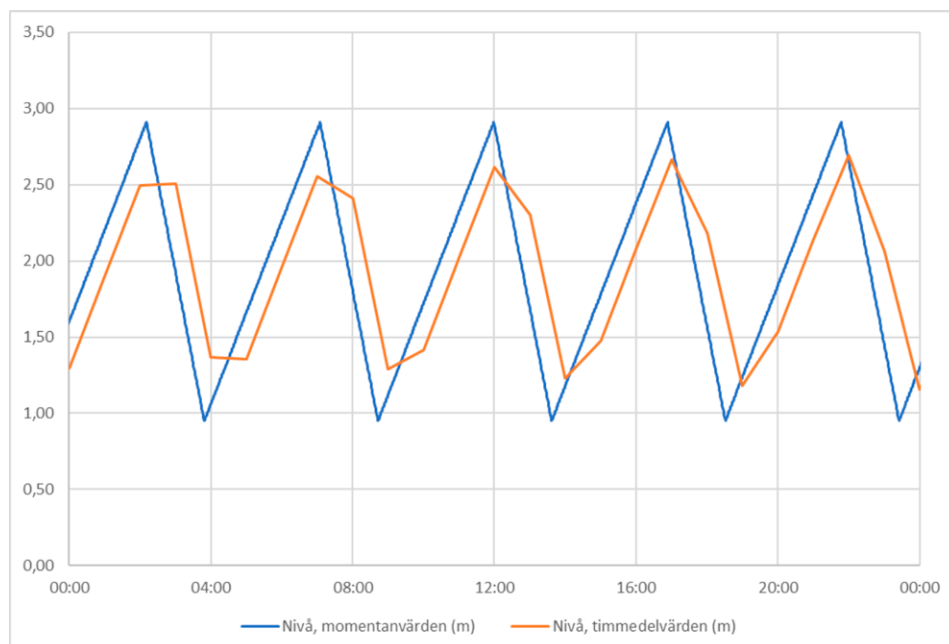


förbrukningen i systemet. Det gör det också lätt att uppdatera modellen med nya förbrukningsdata vid ett senare tillfälle.

Om den icke debiterade förbrukningen och utläckaget ska kunna beskrivas korrekt krävs det att modellen kalibreras mot uppmätta flöden. Det bör göras för olika mätområden/tryckzoner för att få en god överensstämmelse med verkligheten. Om det inte finns mätningar att tillgå får antaganden göras utifrån erfarenhetsvärden.

För att kunna simulera dygnsvariationer krävs det att förbrukningsmönster läggs in i modellen. Förbrukningsmönstren bör ha en tidsupplösning på 1 timme eller högre. Om uppmätta flöden inte finns tillgängliga kan förbrukningsmönster hämtas ur andra modeller med liknande bebyggelsefördelning eller från erfarenhetsvärden till exempel ur SVU-rapport 2020-7 (Hammarlund et al. 2020).

Om det finns tillgång till data över flöde in till olika zoner kan utläckaget bedömas och korrekt förbrukning och dygnsvariation, vanligtvis på timbasis, beräknas för mätperioden. Det gör modellen väldigt mycket bättre. Den data som krävs är flödesmätningar till och från mätområden (sammanfaller ofta med tryckzoner) samt volymförändringar i reservoarer. Ju högre tidsupplösning data har desto bättre eftersom hög tidsupplösning gör att man fångar tidpunkten när flödet till och från en reservoar vänder. Det blir dock väldigt stora datamängder om upplösningen är högre än 1 minut och med en upplösning som är lägre än 10 min är det tveksamt om beräkningarna blir tillförlitliga. Flödesdata kan loggas som medelvärden under intervallet mellan loggningarna medan nivåmätning bör loggas som momentanvärden. I Figur 4.1 visas skillnaden mellan loggning av momentanvärden och medelvärden. Dels förloras kurvans toppar och dalar, dels förskjuts kurvan halva tidsintervaller jämfört med momentanvärdena. Det gör att flödesbalansen blir felaktig om in- och utflöde vid en reservoar matchas mot flödesloggning i samma mätområde. Innan mätperioden bör beställare och modellör komma överens hur och med vilken upplösning flöden och nivåer ska loggas. Det bör även göras ett uttag av data från styr- och övervakningssystemet för att säkerställa att rätt data med rätt kvalitet verkligen går att få för tillräckligt lång period. Datainsamling och analys av data behandlas även i kapitel 11.



**Figur 4.1**

Nivåvariation i högreservoar. Skillnad mellan loggning av momentanvärden och timmedelvärden.

Det är viktigt att flödesbalansen görs för en representativ period på året. För att kunna studera variation över året behövs längre dataserier på vattenproduktion. Dessa behöver inte vara lika högupplösta utan dygnsmedelvärde räcker.

---

#### **4.1.6 Genomgång av befintlig dokumentation av ledningsnät och anläggningar**

Uppbyggnaden av en hydraulisk modell medför en ordentlig genomgång av ledningsnätets databas samt systemets funktion och styrningar av pumpar och regleringar. Det innebär ofta att ledningsägaren får en bättre överblick över sitt system och att systemet blir bättre dokumenterat.

För att effektivisera modellarbetet är det dock lämpligt att göra en ordentlig genomgång av ledningsdatabasen och övrig dokumentation innan modellarbetet påbörjas. Det kommer spara mycket tid och minskar risken för dubbelarbete i själva modellarbetet.

Till att börja med bör man kontrollera att alla nybyggda och omlagda ledningar har uppdaterats i databasen. Det brukar finnas gott om ledningar som i verkligheten är ihopkopplade, men som i databasen korsar varandra utan koppling. Om det finns information om ledningsdimensioner och material mm som inte lagts in i databasen bör det också uppdateras.

Vad gäller anläggningar kan det vara bra att kontrollera att alla styrningar är kända och tydligt dokumenterade. Geometrier och nivåer bör också kontrolleras. Det är en stor fördel om alla nivåer anges i korrekt höjdsystem i underlaget. När det gäller tryckstegringsstationer är det inte bara styrningen som är viktig att dokumentera utan även pumpkapaciteten. Om det finns flödesmätare och tryckgivare, på sug- respektive trycksidan, installerade i en tryckstegringsstation kan pumparnas verkliga driftpunkt undersökas. Den kan sedan jämföras mot den teoretiska pumpkurvan vilket kommer visa om pumparna har den kapacitet som det är tänkt eller om de behöver servas eller till och med bytas. Det är dock viktigt att mätarna är kalibrerade, vilket bör kontrolleras innan mätvärdena används. Om mätmöjligheter saknas är det ändå bra att ta fram den teoretiska pumpkurvan inför modellupbyggnaden.

### **4.2 Uppbyggnad av tryckavloppsmodell**

När en tryckavloppsmodell byggs upp i ett modelleringsprogram som är anpassat för vattennätsmodellering blir det som att bygga en omvänd vattennätsmodell. Systemets trycksläppspunkt beskrivs som en reservoar med fast nivå och vattenförbrukningarna är negativa eftersom flödet ska gå in i modellen i stället för ut.

När modellen för ett befintligt tryckavloppssystem byggs upp krävs i stort sett samma underlag som för en vattennätsmodell. Vattenförbrukningen kan dock läggas in schematiskt eftersom det handlar om att få pumparna att starta på ett så slumpmässigt sätt som möjligt för att se effekter av att många eller få pumpar går samtidigt.

När en tryckavloppsmodell ska användas för att dimensionera eller kontrollera ett ledningsnät som inte byggts ännu får projekteringsritningar eller planeringsskisser användas som underlag. Höjdsättningen görs från data över befintliga eller framtida markhöjder. Pumpkurvor hämtas från pumpleverantörer och styrningar ansätts i modellen om det inte finns uppgifter i projekteringsunderlag eller utredningar.

### **4.3 Uppbyggnad av modell för transientberäkningar**

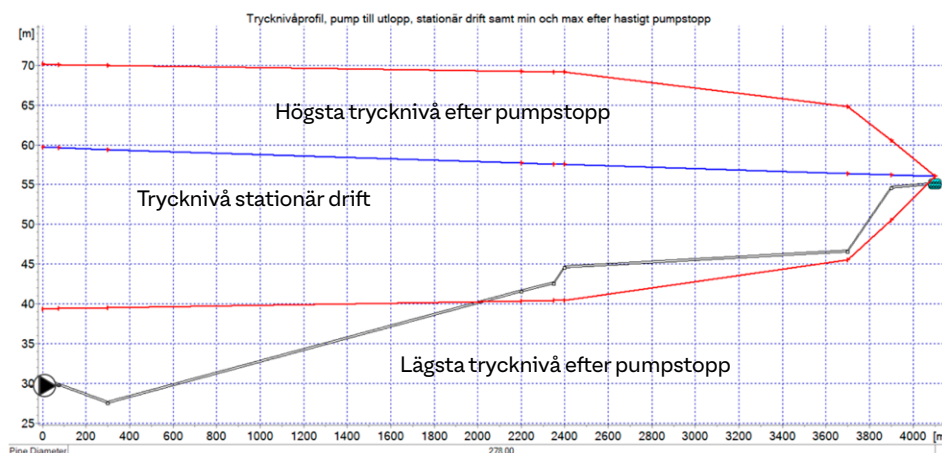
Det finns speciella beräkningsprogram som är avsedda för just tryckslagsberäkningar med till exempel vakuumventiler och tryckklockor. Även leverantörer av armaturer och komponenter kan erbjuda beräkningar på enklare system, ofta med de egna komponenterna som viktiga ingående delar. Men även de vanligaste beräkningsprogrammen för stationära beräkningar på hela distributionssystem har en modul för tryckslagsberäkningar. För att kunna använda dessa något enklare verktyg kan det vara nödvändigt med vissa förenklingar av problembeskrivningen. Grundläggande krav är att hastiga flödesförändringar ska kunna beskrivas rätt.

En modell för tryckslagsberäkningar bör göras enklare än den som används för stationära beräkningar. Eftersom tidssteget i beräkningen är mycket kort, normalt ca 0,1 s, bör beräkningen endast omfatta en period på 5-10 minuter. Tidsåtgången för beräkningen blir annars mycket lång om modellen är stor. Modellen bör inte heller innehålla alltför korta ledningar, det finns ett samband mellan tryckvågens utbredningshastighet, beräkningstidssteg och minsta godtagbara ledningslängd.

För att beskriva händelseförloppet när en pump stannar på grund av strömavbrott krävs att pumpens tröghetsmoment är känt. Det kan vara svårt att få denna uppgift ifrån en pumpleverantör, speciellt med även motorn inkluderad. Om tröghetsmomentet saknas kan i stället pumpens utrullning efterliknas genom att ett flöde trappas ner enligt en tidsserie, till exempel rätlinjigt avtagande flöde under fem sekunder. För att testa betydelsen av antagen tid kan beräkningar göras för några olika alternativ för att på detta vis hitta värsta fallet. För att beskriva förloppet när en ventil stängs krävs att stängningen kan beskrivas med en tidsserie och att ventilkarakteristikan kan läggas in i beräkningen.

Det finns flera möjliga åtgärder för att förebygga tryckslag. Det konventionella är att sätta in en tryckklocka i systemet, men det finns även mer avancerade ventillösningar. Enklare program för transientberäkningar kan simulera effekterna av en tryckklocka. För att simulera effekten av ventillösningar kan det krävas mer avancerade program.

Resultatet, i form av tryck eller trycknivå, kan redovisas som tidsserier i enstaka punkter, som punktvisa resultat över ett helt system eller som profiler mellan valfria punkter i systemet. Man bör speciellt studera lägsta tryck i högt belägna partier. Här finns risk för undertryck när lågtrycksvågen passerar genom systemet från händelsepunkten mot reflektionspunkten, se Figur 4.2 nedan.



**Figur 4.2**

Nivåvariation i högreservoar. Skillnad mellan loggning av momentanvärden och timmedelvärden.

Som vanligt är mätningar en mycket viktig del i kunskapsuppbyggnaden och modelleringen. För åtgärder i befintligt system är mätning en given insats för att kunna optimera åtgärderna. Vid utformning av nya system är mätningar och erfarenheter från befintliga system ett viktigt underlag för både problemformulering och rimliga åtgärder. I detta sammanhang behöver mätningar göras med betydligt högre upplösning än för stationära förhållanden. Det gäller särskilt för korta ledningar av järn samt mätningar i tryckavloppsledningar.

---

# 5 Kalibrering av modell

## 5.1 Syftet med kalibrering

Målet med en modell är att den ska vara en kopia, en digital tvilling, av det system med ledningar och anläggningar som den beskriver. Men när modellen byggs görs antaganden och förenklingar av den fysiska och tekniska utformningen, eftersom det inte alltid är möjligt eller rimligt att ta reda på alla verkliga förhållanden. Kalibrering är en metod att kontrollera hur väl modellen stämmer med verkligheten och vid behov görs justeringar för att nå en bättre överensstämmelse. Modellresultaten jämförs då med data från mätningar av flöde och tryck i ledningssystemet som hämtas från styr- och övervakningssystem eller som görs speciellt för kalibreringen. Den grundläggande kalibreringen kan ofta göras med data från permanenta mätare och sedan kompletteras med tätare mätningar och brandposttappningar för att förbättra beskrivningen av tryckförlusterna i ledningsnätet.

Modeller kalibreras oftast eftersom det ger en uppfattning om hur noggranna svar som kan förväntas på frågor den används för att utreda. Det är däremot inte självklart att en modell alltid måste kalibreras. Om mer övergripande frågeställningar ska utredas, eller om det finns god marginal till kritiska nivåer, är behovet av en mycket noggrann modell och därmed även kalibrering mindre.

Det är viktigt att påpeka att en kalibrerad modell bara är kalibrerad till en viss grad. Grenarna långt ut i ett system är inte kalibrerade bara för att en kalibrering av huvudledningarna har gjorts. Hur kalibreringen gjorts, i vilka punkter och hur väl modellen efterliknar mätningarna ska beskrivas i modelldokumentationen.

## 5.2 Mätdata som underlag till kalibrering

Mätdata för flöden, tryck och nivåer kan hämtas från styr- och övervakningssystemet. Oftast krävs dock att tillfälliga mätningar genomförs på ledningssystem och tillhörande anläggningar för att komplettera med fler mätpunkter. När kompletterande mätningar planeras delas ledningssystemet in i mindre områden och mätpunkterna väljs strategiskt till platser som utgör naturliga avgränsningar. Sådana är till exempel tryckstegringar och reservoarer.

Om antalet mätare är begränsade i förhållande till ledningsnätets storlek måste mätarna flyttas och mätningar göras i omgångar. Tryckmätningar ute på ledningsnätet kan enkelt göras i brandposter eller i anslutna byggnader förutsatt att ingen backventil finns mellan ledningsnät och tryckmätare samt att inga stora uttag görs i byggnaden. Flödesmätningar kräver dock tillgång till en mätarbrunn eller ventilkammare.

Mätningarna bör pågå under en veckas tid för att fånga variationer i flöde och tryck under olika förhållanden. För att få underlag för tryckförlustkalibrering krävs en driftsituation med hög belastning där flödet är känt. Se kapitel 11.

Under de senaste tio åren har det hänt mycket inom mätning av flöde och tryck i ledningsnät. Antalet permanenta mätare ökar, kvaliteten och upplösningen för mätdata blir bättre och kostnaden för lagring av data är inte längre ett problem. Utvecklingen går dessutom snabbt framåt med till exempel fjärravlästa förbrukningsmätare. Utveckling av automatiserade lösningar och AI som kan hantera stora mängder data och dra slutsatser som underlag till kalibrering kommer sannolikt att skapa nya förutsättningar för att kalibrera modeller i framtiden.

---

### 5.3 Arbetsgång vid kalibrering

När mätningarna är klara och mätdata sorterats och kvalitetssäkrats påbörjas kalibreringen. Trycknivåerna i mätpunkterna jämförs vid olika driftsituationer, min- och maxflöde så att de är jämförbara i modellen och i data från mätningarna. När de inte överensstämmer görs justering av ledningarnas förluster i modellen så att de blir större eller mindre. Därefter görs en ny modellkörning och nya jämförelser. Detta arbete upprepas tills tillräcklig överensstämmelse finns vilket kan vara tidskrävande.

### 5.4 Uppgifter för beställare inför mätning och kalibrering

- Beställare av modelluppdrag behöver inför mätning och kalibrering tänka på följande:
- Befintliga mätare och givare behöver kontrolleras, så att de mäter rätt och att tryckgivarnas plushöjder är inmätta.
- Vilka data lagras och kan hämtas från styr- och övervakningssystemet, vilken upplösning har mätningarna (minut, timme, dygn) och i vilket format kan data exporteras?
- När mätningar med tillfälliga mätare utförs ska driftpersonal delta för att säkerställa att inga ingrepp görs i anläggningen som riskerar funktion eller vattenkvalitet.
- Den som upprättar och kalibrerar modellen ska vara ansvarig för planeringen av mätningarna.
- Det är en fördel om den som upprättar och kalibrerar modellen deltar vid mätningarna.
- Tappning ur brandposter under pågående tryckmätning ger ett bättre underlag för tryckförlustkalibrering.

### 5.5 Simuleringar med färdig modell

När modellen är klar görs en simulering som beskriver nuläget och som utgör grunden vid jämförelser med möjliga förändringar av systemet. Resultatet redovisas vanligen som grafiska plottar över tryck- och flödesförhållanden men kan även exporteras som GIS-lager att lägga in i ledningsdatabasen. Fördelen med det senare är att uppgifter om till exempel tryckförhållanden för enskilda abonnenter kan tas fram direkt i kartan vid kundärenden.

Vid önskemål om att göra olika scenariokörningar är det bra att hålla sig till öppna frågor för att beskriva problemställningen eftersom det ger bättre förutsättningar för kreativa lösningar. Det finns naturligtvis ofta ramar, begränsningar eller beslut att förhålla sig till men poängen är att inte lägga till fler begränsningar än nödvändigt.

När ökade eller minskade flöden i ett system ska simuleras är det viktigt att den förväntade förändringen anges så korrekt som möjligt. Om simuleringen gäller en för tätning bör antal tillkommande innevånare per kvarter eller område anges. Då kan förväntad förbrukning enkelt räknas fram och läsas in i modellen.

### 5.6 Förenklingar som påverkar modellresultaten

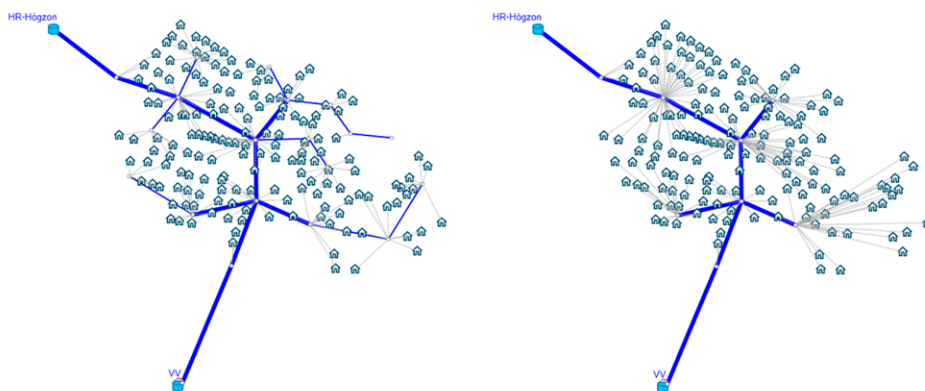
Kvaliteten på resultaten från en vattennätsmodell är beroende av vilka förenklingar som görs när modellen byggs upp. Normalt byggs en modell så detaljerad som det går för hela systemet. Vissa indata är dock viktigare än andra att lägga in korrekt och om avgränsningen görs rätt påverkar det inte kvaliteten på resultatet alls. Om avgränsningar och förenklingar görs på ett felaktigt sätt kan det innebära att modellens resultat blir felaktiga.

Det finns i stort sett aldrig anledning att förenkla eller avgränsa en modell om det finns underlag och systemet inte är mycket stort. I en modell över ett huvuddistributionssystem som försörjer flera kommuner med dricksvatten kan det finnas anledning att inte ta med de olika kommunernas ledningsnät i modellen.

Om det saknas mycket indata måste en avvägning göras mellan vilken arbetsinsats som krävs för att komplettera underlaget och vilken kvalitetsförsämringen det skulle innebära att göra rimliga antaganden. De antaganden som görs måste dokumenteras så att mottagaren av resultaten förstår vilka osäkerheter som finns inbyggda i beräkningen.

### 5.6.1 Avgränsningar

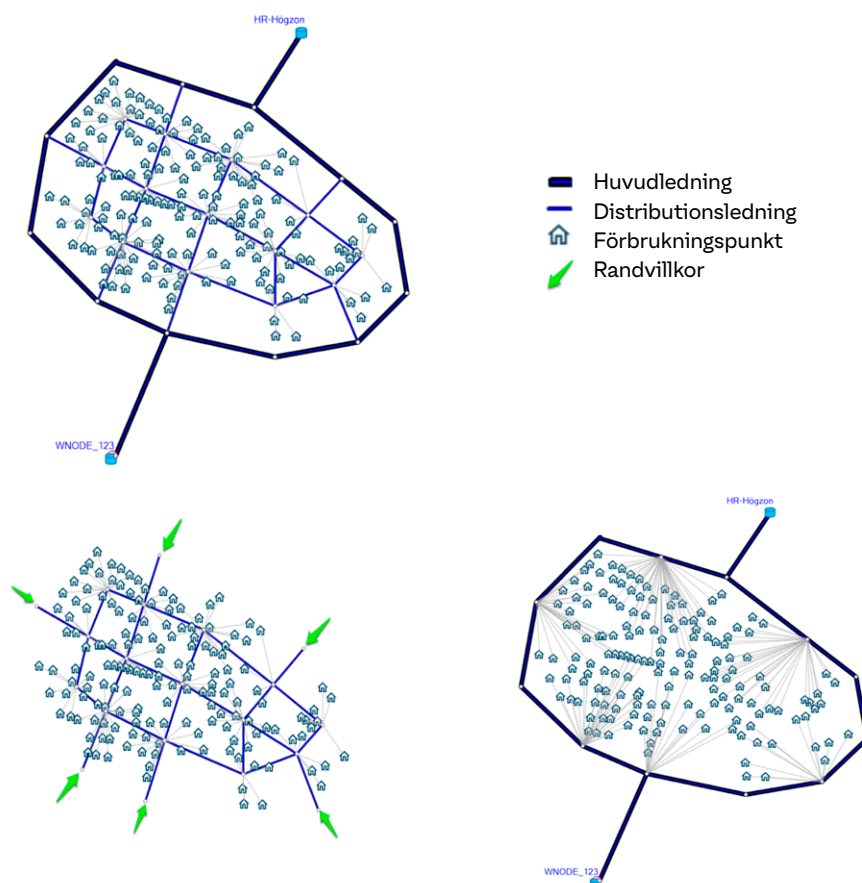
Effekterna av att avgränsa en modell geografiskt är mycket beroende på ledningsnätets egenskaper. Om systemet är uppbyggt som ett förgreningsnät är det lätt att förenkla eller avgränsa utan nämnvärda försämringar av resultatet. Så länge man kapar bort grenar och sparar ledningsnätets stam och all förbrukning (även läckaget i de borttagna delarna) blir resultaten riktiga för de delar som tas med i modellen. Det är dock viktigt att förbrukningen ansätts i den nod där distributionsledningen är kopplad i verkligheten och inte i den nod som ligger närmst förbrukaren i modellen.



**Figur 5.1**

Geografisk avgränsning av ett förgreningsnät.

Ett cirkulationsnät är svårare att avgränsa eller förenkla. Om ledningsnätet är uppbyggt som ett nätverk går det inte att ta bort delar av ledningsnätet utan att modellens kvalitet påverkas eftersom det inte går att säga säkert hur flödet fördelar sig mellan de parallella ledningarna innan systemet har modellerats. Om ledningsnätet däremot är uppbyggt med en cirkulär huvudledning som går runt tätorten med ett nätverk av klenare ledningar inom cirkeln kan mycket av det klenare ledningsnätet slopas om det är huvudledningens funktion som är intressant. Om det är det inre ledningsnätet som ska undersökas kan huvudmatningens cirkelledning uteslutas under förutsättning att trycknivåerna i anslutningspunkterna är kända så att de kan läggas in som randvillkor för det inre ledningsnätet.



**Figur 5.2**

Geografisk avgränsning av ett cirkulationsnät med huvudledning som en krans runt om.

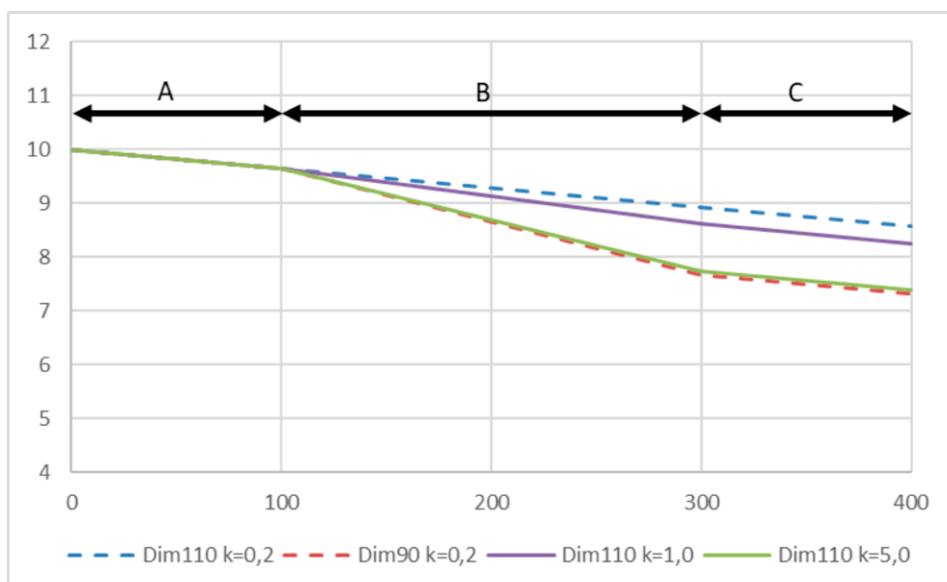
Så länge randvillkoren är korrekta kan modellen avgränsas utan att resultaten blir osäkra. Ett randvillkor måste inte vara ett konstant tryck eller flöde utan kan läggas in som tidsserier. Det är dock viktigt att randpunkten där modellen matas med vatten, väljs så att trycket i punkten inte påverkas nämnvärt av flödet som tas ut i det område som beskrivs i modellen. Om randvillkor läggs in på ett felaktigt sätt i modellen kommer det förstås innebära att resultaten blir felaktiga.

Randvillkor måste beaktas i framtidsscenarioer. Om till exempel förbrukningen ändras avsevärt i ett scenario kan det påverka randvillkoren.

### 5.6.2 Råhet och innerdiameter

Det är betydligt viktigare att ha rätt innerdiameter på ledningarna än att säkert veta vilket material de består av. Friktionsförlusterna ökar nämligen kraftigt vid relativt små minskningar av innerdiametern medan ett felaktigt antagande av råhetstalet inte ger samma effekt.

I Figur 5.3 visas trycklinjer för fyra beräkningar av tryckförluster med samma flöde men med olika egenskaper längs delsträcka B. Den blå streckade linjen visar trycknivån när hela sträckan definierats som en PE-ledning (SDR 17) i dimension 110 mm (ytterdiameter) med råheten  $k=0,2$  mm. Den röda streckade linjen visar trycknivån om delsträcka B i stället getts dimension 90 mm (ytterdiameter) vilket skulle innebära att innerdiametern minskades med 17,6 mm. De lila och gröna linjerna visar trycknivån när delsträckan B har dimensionen 110 mm och råheten  $k=1,0$  mm respektive  $k=5,0$  mm. Delsträckorna A och B har dimension 110 mm och råheten 0,2 mm i alla beräkningarna. Figuren visar att råheten måste ökas från 0,2 mm till 5 mm för att det ska motsvara dimensionsminskningen. Råheter avhandlas även i kapitel 8.2.2 i del 3.



**Figur 5.3**

Effekter på tryckförluster vid fel dimension och fel råhetstal.

### 5.6.3 Reservoarer

Det är viktigt att volymen och nivåerna för reservoarer är korrekta medan geometrin (cirkulär eller kvadratisk) är oväsentlig. Vid flödesbalansberäkningar är det mycket viktigt att volymens variation med djupet i reservoaren stämmer med verkligheten. Det är därför viktigt att till exempel beskriva en svampformad reservoar korrekt. Eftersom det inte är självklart att nivåmätningen utgår från reservoarens bottennivå bör det alltid kontrolleras vad mätningen relaterar till.

### 5.6.4 Tryckstegringar och tryckregleringar

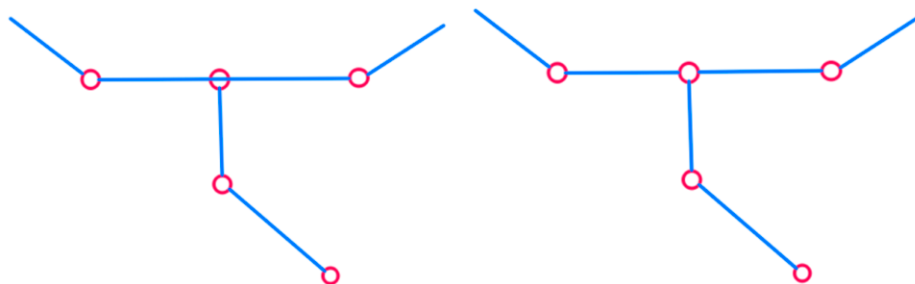
Det är viktigt att egenskaperna för tryckstegringar och tryckregleringar är korrekta eftersom utgående tryck och flöde utgör randvillkor för beräkningarna efter anläggningen. Om driftförhållandena vid en tryckstegring är likartade under hela simuleringen räcker det att pumpens driftpunkt anges. Om simuleringen däremot innebär att pumpen ska arbeta med olika förutsättningar och därmed med olika driftpunkter måste pumpkurvan läggas in.

## 5.7 GIS, stödfunktioner

Så länge ledningsdatabasen är uppdaterad och innehåller alla uppgifter går det snabbt att importera ledningsnätet till modellprogrammet. Om det däremot saknas mycket uppgifter är risken stor att det går mycket tid till manuella justeringar. När en modell byggs upp utifrån en ledningsdatabas finns det nästan alltid ett behov av att bearbeta data innan den importeras till modelleringsprogrammet. Det görs bäst i ett GIS-program där databasen kan förbättras genom att objekt som saknar viss information uppdateras. Saknade uppgifter om dimension eller rörmaterial kan ofta hämtas från närliggande objekt eller antas från andra unika värden. Alla rör med ytterdiametern 110 mm kan till exempel antas vara plaströr av någon sort.

Det går även att använda GIS-program för att koppla ihop ledningssträckor med rätt noder. Om en nod ligger på en ledning utan att vara kopplad till den i databasen så måste ledningen delas och delarna kopplas till noden. Flera modelleringsprogram är baserade på GIS-plattformar och vissa har inbyggda funktioner för att identifiera brister i databasen göra justeringar av data. En sådan genomgång ger även information om vilka justeringar som bör göras i ledningsdatabasen.





**Figur 5.4**

Ledning som korsar nod  
före och efter delning av  
ledningen.

De förändringar av underlaget som görs måste dokumenteras. De objekt som får nya attribut bör föras med en statuskod för de förändrade attributen. Det beskrivs närmare i kapitel 13.

Resultaten av simuleringar med den färdiga modellen kan med fördel redovisas med hjälp av GIS för att göra tydliga illustrationer i plan, se Figur 6.1.

## 6 Redovisning av resultat

Med den upprättade modellen kan flera olika driftscenarier simuleras, såväl för befintliga förhållanden som för framtida. En stor mängd beräkningsresultat kan genereras och presenteras på flera olika vis. Beroende på vilka frågeställningar som är i fokus bör redovisningen av beräkningsresultat anpassas så att de är överskådliga och lätta att förstå.

Vid beräkning med stationära förhållanden finns bara resultat från ett tidssteg att redovisa. Vid en utökad simulering väljs ett tidssteg ut för vilket beräkningsresultatet visas. Flera programvaror har också möjligheten att räkna fram statistik för vad som är det högsta eller lägsta beräknade värdet i varje nod eller ledning under den utökade simuleringen. Eftersom till exempel trycket kan vara lågt vid olika tidpunkter i olika delar av ett system så är detta ett bra sätt att redovisa resultat. Det är dock viktigt att det tydligt framgår i presentationen vilket scenario eller tidsperiod som resultatet avser.

Resultatredovisning ska anpassas efter de frågeställningar som är aktuella. Vad som är en tydlig redovisning i ett fall behöver inte vara det i ett annat. Nedan följer förslag på några resultatredovisningar som är grundläggande och nyttiga i flera fall.

### 6.1 Plan med vattentryck

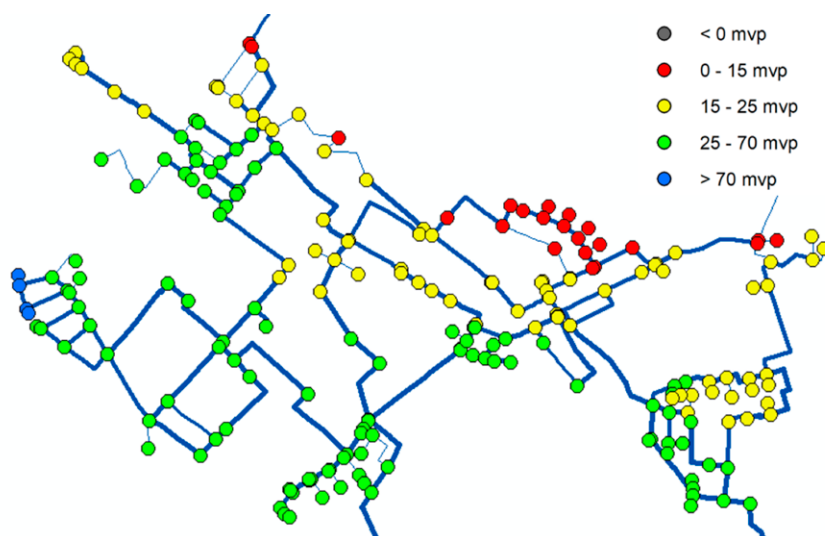
Beräkningsresultatet för vattentryck är lämpligt att redovisa i plan så att det är enkelt och överskådligt att se vilka områden som har problem med höga eller låga tryck.

VA-huvudmannen har enligt P114 krav på sig att leverera vatten till abonnenten med ett tryck på minst 15 mvp över högsta tappställe i anslutningspunkten. Detta är ett av de grundläggande kraven som finns på distributionssystemen och därför bör beräkningsresultat för tryck alltid relateras till detta. Vidare är högsta rekommenderade tryck för abonnenter 70 mvp. När tryckresultat visas bör skalan anpassas för dessa gränser så att det tydligt framgår vilka områden som har resultat som ligger nära acceptabla gränser.

Information om högsta tappställe inkluderas normalt inte i modellen utan noderna tilldelas ofta marknivåer och vattentryck beräknas därför relativt marknivån. I ett normalt enbostadsområde kan antas att högsta tappställe är ca 5 m ovan marknivån. För områden med höga flerbostadshus eller med fastigheter belägna betydligt högre än distributionsledningarna kan det krävas en särskild studie.

I Figur 6.1 visas ett exempel på redovisning av lägsta beräknade vattentryck i plan.

I kapitel 12 ges rekommendationer på intervall för redovisning av resultatvärden.

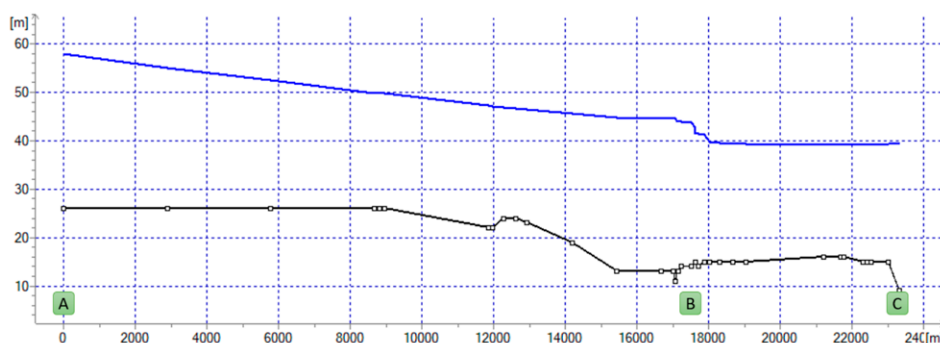


**Figur 6.1**

Plan över lägsta simulerade vattentryck under en utökad simulering. I detta fall har föreslagna framtida utbyggnadsplaner simulerats och det kan utläsas att tryck i den södra, högre belägna, delen av samhället blir oacceptabelt låga. Beräkningsresultatet visar därför att åtgärd behöver vidtas om planerna ska kunna realiseras.

## 6.2 Profiler på huvudsträckor

Ledningsprofiler där trycknivå redovisas tillsammans med marknivå och eventuellt vattentryck är en bra metod för att visa funktion på huvudsträckor. En profil med trycknivå visar tydligt hur trycklinjen lutar på grund av aktuellt flöde och friktionsförlusterna i ledningar. Kapacitetsbegränsade avsnitt längs en ledningssträcka kan då identifieras. Profiler har också den pedagogiska fördelen att de visar vattnets väg från vattenverk till högreservoar och hur trycket höjs vid tryckstegringsstationer. Ett exempel på en profilredovisning visas i Figur 6.2.



**Figur 6.2**

Profil över en överföringsledning. Ledningar och noder visas i svart och trycknivå i blått. Trycket faller konstant mellan samhälle A och B. Inom samhälle B är friktionsförlusterna lokalt större.

I en profil visas en avgränsad del av ett system. Att redovisa profiler i ett systems alla ledningssträckor skulle vara tidskrävande och sannolikt ge mer information än vad som är användbart. Profiler lämpar sig på huvudsträckor, som exempelvis mellan vattenverk och högreservoar eller längre överföringsledningar mellan samhällen.

## 6.3 Plan med vattenhastighet

Beräkningsresultatet av vattenhastigheter är också lämpligt att redovisa överskådligt i plan. För vattenhastigheter finns emellertid inte ett entydigt samband mellan hastighet och vad som är bra eller dåligt, eftersom detta beror på flera andra faktorer. Extremt höga hastigheter kan dock medföra onormalt slitage i ledningen. Vattenhastigheter upp till 1,0 m/s kan anses vara normalt.

Om en utökad simulering har genomförts är det lämpligt att beräkna statistik för högsta hastighet och redovisa detta i plan. I P114 anges att vattenhastigheten 0,2 m/s bör uppnås minst en gång per dygn.

Vattenhastigheten i tryckavloppsledningar bör enligt P110 överstiga 0,6 m/s för att säkerställa självrensning.

Redovisning av högsta beräknade hastigheter i plan kan också användas för att överskådligt identifiera sträckor där det är risk för högre friktionsförluster. Om en ledningssträcka har väsentligt högre hastighet än omkringliggande ledningar så är detta potentiellt en sträcka som bidrar till friktionsförluster och lägre tryck.

Om programmet inkluderar riktning (plus eller minus) vid redovisning av hastighet är det lämpligt att beräkna absolutbelopp för att göra redovisningen på plankarta mer överskådlig.

Figur 6.3 visar ett exempel på beräknad hastighet redovisad i plan.



**Figur 6.3**

Exempel på redovisning vattenhastighet i plan. Absolutbelopp har beräknats för simulerade hastigheter från en utökad simulering, och därefter har högsta värdet per ledning beräknats och redovisats.

I kapitel 12 ges rekommendationer på intervall för redovisning av resultatvärden.

## 6.4 Omsättning

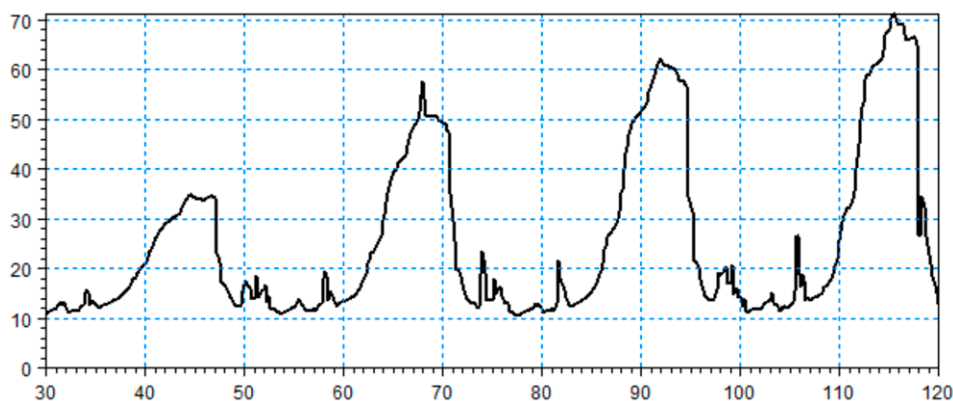
Med en modell kan vattenålder i ledningar beräknas. Vattenålder visar hur lång tid som passerat mellan det att vattnet lämnat modellens start-/inmatningspunkt tills det nått aktuell ledning. Vattenålder är ett relevant mått men det går emellertid inte att sätta en generell värdering på vad som är acceptabelt då det beror mycket på vattenkemi och rörmaterial. Modellens beräkningsresultat för omsättning kan däremot användas för att visa hur vattenåldern generellt varierar i ett distributionssystem, genom redovisning i plan. Ett exempel visas i Figur 6.4.



**Figur 6.4**

Exempel på redovisning av högst beräknad vattenålder i ledningar under en utökad simulering.

Modellens resultat kan också användas för att planera provtagning av vattenkvalitet. Till exempel kan flödesmönstret i ett system variera mycket beroende på om nivån i en högreservoar är stigande eller sjunkande. Vatten i högreservoarer kan ofta ha en relativt hög ålder beroende av hur den sänks av/fylls upp och hur in-/utlopp är utformade. Vattnet som når en abonnent kan därför ha olika vattenålder olika tider på dygnet, beroende på om vattnet för stunden kommer från vattenverk eller från högreservoar. Genom att med modellen se var i systemet och när på dygnet som vattenåldern potentiellt är som högst, kan prov tas där risken för kvalitetsproblem är som störst. Genom ett sådant arbete kan för ett specifikt system definieras acceptabla gränser för vattenåldern. Ett exempel på variation av vattenålder i en punkt visas i Figur 6.5.



**Figur 6.5**

Exempel på resultat för vattenålder i en nod i en modell. I resultatet kan ses skillnad på om noden erhåller vatten direkt från vattenverket eller från reservoaren (vars vattenålder ökar under simuleringen). Y-axeln visar reservoarens medelvattenålder i timmar medan X-axeln visar simuleringstiden i timmar.

---

## Del 3

# Praktiskt arbete med modellering

Del 3 av rapporten riktar sig till dem som bygger upp hydrauliska modeller och kör simuleringarna. Avsikten är att ge en djupare kunskap om hur arbetet ska utföras och ge förslag på hur antaganden bör göras. Ett kapitel behandlar även hur dokumentationen av modellen och simuleringarna bör göras.

## 7 Teoriintroduktion

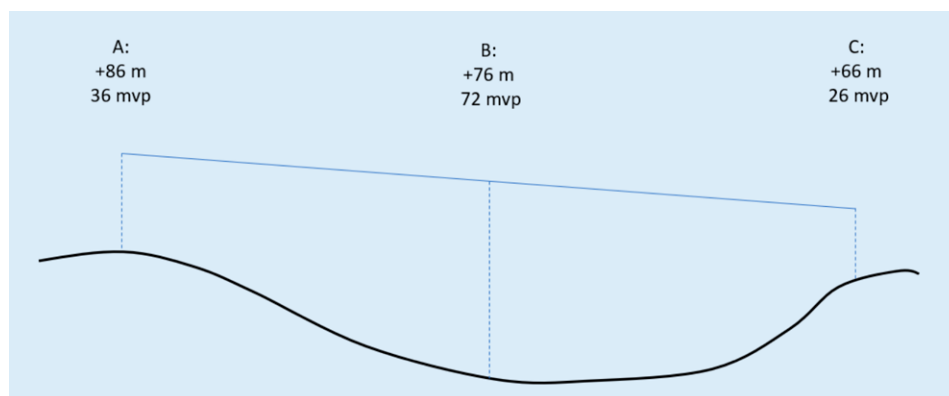
Det är viktigt att förstå varför vi modellerar och hur en modell fungerar. Här följer därför en kort teoriintroduktion.

Varje modellör måste ha förståelse för skillnaden mellan trycknivå och vattentryck:

**Trycknivå:** Trycket i en viss punkt/ledning i förhållande till höjdsystemets referensplan, så kallas "plushöjd". Anges normalt med enheten +m.

**Vattentryck:** Trycket i en viss punkt/ledning. Anges normalt med enheten mvp (meter vattenpelare) eller bar

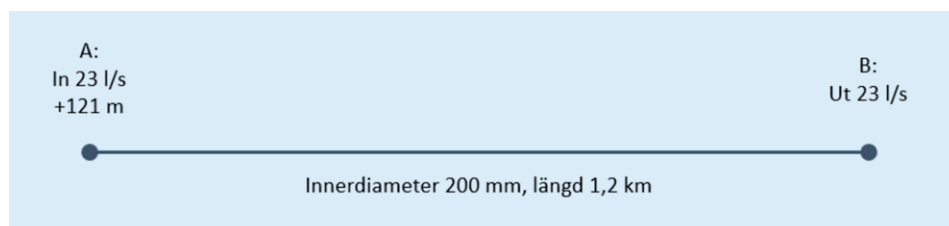
Trycknivån i en viss punkt innebär en lägesenergi i den punkten. Om vatten flödar från en punkt till en annan punkt uppstår en energiförlust i form av friktionsförluster, som kommer minska trycknivån i den andra punkten. Den andra punktens plushöjden i förhållanden till den första kommer bestämma om vattentrycket blir högre eller lägre. Exempel visas i Figur 7.1. I detta exempel leder ett vattenflöde från punkt A till punkt C till en friktionsförlust som minskar trycknivån. På grund av att marknivån minskar mer än trycknivån är dock vattentrycket högre vid punkten B än vid A.



**Figur 7.1**

Exempel på beräkning av trycknivå och vattentryck. Tjockare svartlinje visar marknivå och blå linje visar trycknivå.

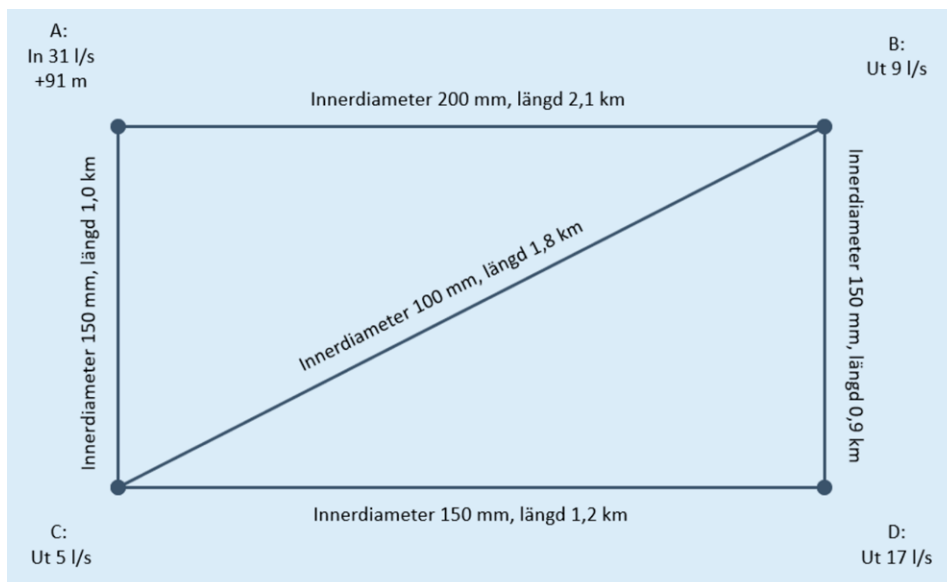
Beräkning av tryckförlust genom en enskild ledning är relativt enkelt. Exempel visas i Figur 7.2. Flöden är kända parametrar såväl som trycknivån i ena änden av ledningen. Råhetstal måste antas. Genom exempelvis diagram för Colebrook-White-ekvationer kan förlusten från nod A till B beräknas och trycknivån vid B således bestämmas.



**Figur 7.2**

Exempel beräkning av friktionsförluster och tryck i enkel ledning

Beräkning av tryck i ett cirkulationsnät blir omedelbart mer komplext. Ett exempel visas i Figur 7.3. Detta exempel visar ett ledningsnät där flödet i huvudsak går från övre vänstra hörnet till nedre högra hörnet.



**Figur 7.3**  
Exempel beräkning  
cirkulationsnät

I det första exemplet är flödet genom ledningen känt, eftersom flöde in och ut ur den är kända parametrar. I det andra exemplet är flödet in och ut de olika noderna känt, men flödesfördelningen mellan ledningarna är inte kända. Det går inte ställa upp ekvationer för att algebraiskt beräkna flödet i respektive ledning. Istället måste en numerisk lösning användas. Detta innebär att en flödesfördelning gissas och sedan kontrolleras. Kontroll genomförs genom att beräkning av tryckförluster måste ge samma resultat oavsett över vilken sträcka som beräkning sker. Om trycket vid D blir annorlunda vid beräkning A-B-D än vid beräkning A-C-D är den antagna flödesfördelningen felaktig. Antagandet måste då korrigeras och ny beräkning genomförs. Detta repeteras tills en acceptabel felmarginal uppnåts. Denna metod där initialt värde antas och kontrolleras kallas numerisk beräkning eller iterationsberäkning.

Det är en tidskrävande process att för hand beräkna flödesfördelning och tryckförluster genom ett cirkulationsnät, även om det finns hjälpmedel och metodiker som underlättar (exempelvis Hardy-cross-metoden). Det är en nyttig övning för varje modellör att någon gång genomföra en handberäkning av ett cirkulationsnät för att öka förståelsen för de numeriska beräkningarna som de hydrauliska modellerna genomför. Ett sådant exempel finns i VAV P83.

Med hjälp av datorberäkningar kan dessa numeriska beräkningar genomföras långt snabbare än vad som är möjligt för hand. Utökas antalet möjligheter till rundmatning ökar också komplexiteten så att det blir snudd på omöjligt att lösa med handberäkning, medan en datorberäkning kan lösa det på några sekunder.



---

## 8 Uppbyggnad av modell för vattennätsmodellering

Distributionssystem kan modelleras med olika detaljeringsnivå. Det är tänkbart att exempelvis bygga en modell som bara innehåller de största huvudledningarna mellan vattenverk och vattenreservoaren. Denna typ av kraftiga förenklingar var vanliga förr när beräkningskapacitet var begränsande. De flesta ledningsnät kan idag modelleras på en vanlig PC utan större problem och därtill finns flera hjälpmedel för att underlätta modelluppbyggnaden. Därför rekommenderas att hela distributionssystemet, inklusive alla distributionsledningar, tas med i modellen. Servisledningar bör utelämnas eftersom det ofta saknas information om dem i underlaget. Genom att inkludera hela systemet förbereds också modellen för att kunna nyttjas till alla möjliga frågeställningar och utredningar. Samma modell kan då användas för att studera huvudledningar och huvudanläggningar, såväl som distributionsledningar ut till yttersta abonnent.

Situationer där förenklade modeller kan övervägas är för mycket stora system, exempelvis distributionssystem som sträcker sig över flera städer i flera kommuner. Avgränsningspunkter som verkar logiska ur ett administrativt perspektiv är dock ofta olämpliga vid studie av hydraulisk funktion. Det talar också för att inte dela upp systemet i mindre modeller.

### 8.1 Randvillkor

Randvillkor är de yttre omständigheter som bestämmer förutsättningarna för en beräkning eller en simulering, se introduktion i Del 2 kapitel 4.1.1. Underlag för randvillkor vid nulägesmodellering med en vattennätsmodellering kan oftast läsas ut ur styr- och övervakningssystemet. Vid simuleringar av ännu inte byggda system får rimliga randvillkor ansättas.

Vid beräkning med stationära förhållanden beskriver randvillkoren de förutsättningar som ska gälla i den situation som man vill studera. Vid simulering under en utökad period kan randvillkor vara variabla mellan tidssteg (exempelvis nivå i en reservoar) eller fasta under hela simuleringen (exempelvis en utgående trycknivå vid ett vattenverk).

Randvillkor delas här upp som trycknivåer, inflöden (vattenproduktion) och utflöden (förbrukning och läckage).

#### 8.1.1 Trycknivå

En vattennätsmodell måste ha minst en definierad trycknivå som randvillkor i varje tidssteg, annars kommer inte beräkningen kunna genomföras alternativt ge felaktiga eller instabila resultat. Randvillkor kan exempelvis vara en fast trycknivå från en tryckstegringsstation eller ett vattenverk som utgör modellens startpunkt.

Randvillkor för trycknivå kan också vara vattennivån i en reservoar mitt i ledningsnätet. En fördefinierad initial vattennivå blir då randvillkor för en beräkning med stationära förhållanden eller för första tidssteget i en simulering under en utökad period. När vattennivån förändras över ett tidssteg så förändras också randvillkoret för beräkning i nästkommande tidssteg. Här ska observeras att om reservoaren är modellens enda randvillkor för trycknivå och reservoaren under simulering töms, så kommer modellen inte längre ha något randvillkor för trycknivå och modellens beräkningsresultat kommer att bli instabilt. Detsamma kan ske om reservoaren blir full. Problemet med instabilitet vid full reservoar går dock att lösa, se kapitel 8.2.3.

Vid simulering av brandvattenuttag kan det lägga tillåtna trycket i uttagspunkten

---

vara ett randvillkor för trycknivå. I modellens iterationsberäkning ansätts då denna trycknivå som randvillkor varefter uttagsflöde balanseras mellan detta randvillkor och övriga randvillkor (både tryck och flöde).

### 8.1.2 Inflöde

Inflöde kan i en vattennätsmodell beskrivas enligt två principer:

En reservoar med fast trycknivå (oändlig volym) definieras i den nod som modellens ledningsnät försörjs ifrån. Faktiskt inflöde blir då ett resultat av modellens beräkning

Ett inflöde definieras i den nod som modellens ledningsnät försörjs ifrån. Detta kan vara ett fast flöde eller en fördefinierad flödeskurva. Detta kan också benämnas negativ förbrukning (flöde riktat in i ledningsnätet)

Vanligast förekommande är att beskriva inflöde med hjälp av den första principen, då det generellt är lättare att balansera modellens flöden och få stabila beräkningsresultat med den metoden. Detta kan också vara närmare verkligheten, då produktionen i ett vattenverk ofta anpassas efter rådande vattenförbrukning. Med denna princip blir inflödesnoden också ett randvillkor för tryck för modellens beräkningar. Detta innebär att tryck beräknas från denna punkt och ut i ledningsnätet.

Med den andra principen definieras inte ett randvillkor för tryck vid inflödesnoden. Det är då viktigt att randvillkor för tryck definieras på någon annan plats i modellen. Tryck kommer då att beräknas bakåt tillbaka till inflödesnoden. Denna princip förutsätter att det finns en vattenreservoar någonstans i modellen som kan balansera differenser mot utflödet. Om reservoar inte finns och in- och utflöde inte är exakt lika stora kommer de numeriska beräkningarna inte kunna lösas vilket leder till att modellen blir instabil.

### 8.1.3 Utflöde

Utflödet, det vill säga förbrukning och läckage, kan beskrivas olika beroende på modellens syfte. Vanligast och rekommenderat är att abonnentregister används för att fördela förbrukning över ett ledningsnät. Beräkning av flödesbelastning, både abonnenters förbrukning och läckage, genom uppställning av flödesbalanser är beskrivet i avsnitt 11.2. Abonnentregister och framräknade förbrukningsmönster importeras då till modellen och kopplas till noder.

I vissa fall kan det vara mer tidseffektivt att definiera utflödet i enskilda noder, exempelvis vid förenklade modeller av stora ledningsnät där specifika driftscenarier ska analyseras.

## 8.2 Distributionssystemet

Distributionssystemet består av ledningsnätet och dess tillhörande anläggningar. Dessa behandlas i följande kapitel.

### 8.2.1 Ledningsnätet

Ledningsnätet importeras normalt från en ledningsdatabas. Lämpligt filformat beror på vilket databassystem underlaget hämtas från och vilket program som används för modelleringen.

Många gånger är det tidsbesparande att göra en förbehandling av det erhållna ledningsnätet innan import till modelleringsprogrammet. Vanliga exempel är överenskomna förenklingar av ledningsnät eller komplettering av uppgifter där det saknas. Det är ovanligt att en modelluppbyggnad går att lösa genom helt automatiserade importrutiner, utan det krävs normalt ett visst manuellt justeringsarbete.

Ledningar måste minst definieras med innerdiameter och råhetstal. Därtill innefattar flera modelleringsprogramvaror möjlighet att även föra in information som normalt finns i en ledningsdatabas, exempelvis material och anläggningsår. Vid import är det

---

lämpligt att också inkludera namngivning av ledningar (och andra objekt) enligt ledningsdatabasen vilket underlättar kommunikation och framtida uppdateringar. Det rekommenderas även att i modellen göra anteckningar om datum för uppdatering, specifika antaganden och förutsättningar.

I en ledningsdatabas kan det finnas information om både innerdiameter och ytterdiameter. Det kan dock vara blandat eftersom dimension för plaströr av tradition anges som ytterdiameter medan järnrördimensioner anges som innerdiameter. För plaströr måste då underlaget kompletteras med innerdiameter. Den varierar dock mellan rör av olika material och olika tryckklass. Saknas information för att säkert ta fram innerdiametern måste antaganden göras. Sådana antaganden måste dokumenteras. Om det gäller långa och/eller kritiska ledningssträckor bör kompletterande underlag sökas i relationshandlingar eller liknande. I de fall kompletterande underlag tas fram bör det även föras in i ledningsdatabasen.

Ledningarna i en vattenmodell sammankopplas i noder. Det är mellan dessa noder som modellen utför numeriska beräkningar för rådande förutsättningar i aktuellt tidssteg. Det finns därför ett samband mellan antalet noder och modellens detaljgrad och tiden det tar att genomföra en simulering.

I noderna definieras marknivåer för att kunna beräkna geodetiska trycknivåer. Eftersom ledningsnivåer normalt inte finns i ledningsdatabasen hämtas underlag oftast från någon höjddatabas, till exempel nationella höjddatabasen (NNH). Det blir allt vanligare att kommunerna har gjort egna flygskanningar av tätorterna med högre upplösning än NNH. I sådana fall kan sådan data användas i stället. När marknivån lagts in i modellen kan noderna antingen ges samma nivå som marken eller en nivå med ett visst djup under marken. Om noderna ges marknivå kan trycket över markytan läsas av direkt i resultatfilerna. Om det i stället är trycket i själva ledningen som är intressant bör mer korrekta ledningsnivåer eftersträvas i modellens noder.

Noder måste finnas vid förgreningar och ledningskorsningar. Om två ledningar korsas utan att vara anslutna till varandra får inte någon nod skapas i den punkten.

En lång överföringsledning utan anslutningar behöver egentligen inga noder längs med sträckan för att beräkna tryckfall och flöde. För att se vattentrycket längs sträckan är det dock bra att dela upp ledningen med noder i låg och högpunkter för en bättre topografisk beskrivning av ledningen.

I ledningsdatabaser är anläggningar som exempelvis ventilkammare och tryckstegringsstationer ofta markerade som enskilda punkter. För att kunna simulera funktionen med anläggningen samt olika driftfall krävs ofta att dessa anläggningars rörgalleri helt eller delvis inkluderas i modellens ledningsnät. Det kan därför ibland krävas ritningar över dessa anläggningar som underlag.

### **8.2.2 Förluster i ledningar**

Det är viktigt att tryckförluster i ledningsnätet blir rätt i modellen. Därför måste ledningarna ha rätt innerdiameter och ett rimligt råhetstal, se avsnitt 5.6.2. En rekommenderad utgångspunkt är att ange 0,2 mm som råhet för plastledningar och 1,0 mm för övriga ledningar. Tabeller med råhetstal från olika källor finns i Bilaga C.

De flesta svenska ledningsnät innehåller en betydande andel järnledningar. Gamla gjutjärnsledningar på sträckor med låg vattenhastighet är särskilt korrosionsbenägna och många gånger är det de ledningarna som står för de största förlusterna i ledningsnätet.

Ur information om material och eventuellt även anläggningsår kan antaganden om råhetstal göras. Råhetstalet kan dock variera mycket vilket är en viktig orsak till att modellen måste kalibreras med hjälp av tryckmätningar för att vara tillförlitlig. Kalibrering är vidare beskriven i kapitel 11.

---

### 8.2.3 Reservoarer

Reservoarer utjämnar flöden i distributionssystem och måste inkluderas i modellen för att ge en god beskrivning av systemets funktion.

Det är kritiskt att reservoarer är beskrivna med rätt geometri för att en modell ska ge tillförlitliga resultat. För en reservoar med lodräta väggar erhålls ett linjärt förhållande mellan volym och djup i reservoaren. Det är då viktigt att beskriva bottenarean samt höjd på reservoaren rätt. För en svampformad reservoar blir förhållandet istället icke linjärt. Vissa modellprogramvaror har definitioner för flera typer av reservoargeometrier medan andra kräver att relationen mellan djup och volym definieras som en funktionskurva. Ett sådant förhållande kan beräknas genom att studera ritningar för reservoaren.

Reservoarer kan i modellen också beskrivas med en fast trycknivå. Reservoarens vattennivå ändras då inte oavsett hur mycket vatten som går in eller ut. Detta kan användas för att representera reservoarer vid stationära beräkningar. Vanligtvis används dessa reservoarer som inmatningspunkter för till exempel ett vattenverk. Detta beskrivs i avsnitt 8.1.2.

Ibland är det bra att inkludera reservoarer bräddavlopp i en modell. Många modellprogram får instabila beräkningar då en reservoar blir full, på grund av att beräkningarna inte är anpassade för trycksättning av en reservoar vilket skulle bli konsekvensen om bräddavlopp inte finns. Då ett modellprogram för trycksatta system normalt inte hanterar hydraulik för överfall måste det beskrivas på ett annat sätt. En lösning är att i modellen placera en fiktiv reservoar med fast nivå intill den verkliga reservoaren och koppla samman de två med en backventil som bara tillåter flöde mot den fiktiva reservoaren. Trycknivån i den fiktiva reservoaren sätts till bräddavloppets nivå. Genom denna metodik kommer modellen tillåta ett flöde ut ur systemet när nivån i reservoaren går över bräddnivån. Det är emellertid inte säkert att denna metodik fungerar eller behövs i alla modellprogramvaror.

### 8.2.4 Tryckstegringsstationer

Tryckstegringsstationer kan beskrivas på olika sätt. För att välja lämplig metod är det viktigt att ha en förståelse för den aktuella stationens funktion och utformning. Följande kan också vara tillämpligt för vattenverk.

I det enklast fallet består en tryckstegringsstation enbart av en pump. Pumpkurvan läggs då in och flödet vid driftpunkten beräknas utifrån skillnaden i trycknivån mellan pumpens sug sida och trycksida.

Det är emellertid vanligt att tryckstegringsstationer har flera pumpar som kan frekvensstyras. Det kan också finnas en hydrofor. Möjligheten till att beskriva detta varierar mellan olika modelleringsprogramvaror. Hur noggrant stationens funktion kan beskrivas påverkas också av vilket underlag som finns tillgängligt.

En förenklad representation av stationen är emellertid ofta fullt tillräcklig. Om en station är utrustad med flera frekvensstyrda pumpar som styrs för att hålla ett fast utgående tryck, och eventuellt en hydrofor, så kan det i en modell exempelvis förenklat representeras genom:

- En enda pump med ett överdrivet stort frekvensstyrningsomfång samt reglering mot angivet tryck
- En enda pump med överdriven kapacitet genom en fiktiv pumpkurva, följt av en tryckreduceringsventil som reducerar ned till den utgående trycknivån
- Rätt antal pumpar med rätt pumpkurvor, följt av en tryckreduceringsventil som reducerar ned till den utgående trycknivån

Med de två senare metoderna kan beskrivning av flerpumpsdrift kombinerat med frekvensstyrning undvikas, något som kan vara svårt att åstadkomma beroende på modellprogram. Med färre modellobjekt kan det också vara enklare att få stabila

beräkningsresultat. Det måste dock kontrolleras att kapaciteten inte blir orimligt hög med de förenklade beskrivningarna enligt de två första metoderna. Det är framförallt viktigt när modellen används för att testa framtida scenarier eller effekten av ett stort flödesuttag. För det sistnämnda exemplet undviks eventuell problematik med att lyckas beskriva regleringsvillkor för utrustningen, men maximal kapacitet blir fortfarande rätt representerad.

I de flesta ledningsdatabaser är tryckstegringsstationer markerade som enskilda punkter. För att kunna simulera tryckstegringsstationers funktion krävs ofta en komplettering av modellens ledningsnät så att tryckstegringsstationens rörgalleri helt eller delvis inkluderas. Detta för att exempelvis kunna inkludera flera pumpar eller kunna koppla pumpar korrekt till olika tryckzoner.

Rörgalleriets exakta geometri och dimension är sällan kritiskt eftersom det rör sig om korta sträckor. Väljs förenklade metoder för att representera pumpdriften kan rörgalleriet normalt beskrivas med omkringliggande ledningars dimensioner. Om pumpdriften ska beskrivas så verklighetstroget som möjligt för att kunna utvärdera pumpars driftpunkt etcetera behöver även rörgalleriets längd och dimension definieras noggrannare. Vid sådana fall kan det även vara nödvändigt att ta med punktförluster i krökar och liknande. Det är dock ovanligt att gallerier beskrivs så detaljerat.

### 8.2.5 Ventiler

I modeller över distributionssystem inkluderas normalt inte avstängningsventiler, istället stängs en ledning där ventilen sitter. Om avstängningsventilers position ska redovisas görs det bäst som ett separat GIS-lager.

Ventiler med mer speciella funktioner som till exempel tryckreduceringsventiler, flödeskontrollventiler eller motorventiler ska däremot alltid inkluderas i modellen. Dessa har en betydande roll i hur distributionssystemet fungerar och det är därför viktigt att de beskrivs på rätt sätt i modellen. För att verifiera inställning och verklig funktion hos exempelvis en tryckreducering är det lämpligt utföra tryckmätningar före och efter.

Hur backventiler definieras kan variera mellan olika programvaror. Ofta appliceras samma metodik som för avstängningsventiler, det vill säga att funktionen definieras på motsvarande ledningssträcka (flöde tillåts endast i en riktning). Om tryckfallet över backventilen behöver beskrivas noggrannare, eller om det önskas tydligare redovisning av var den är placerad, kan det vara lämpligare att i modellen använda ett ventilobjekt istället för ledningsobjekt.

### 8.2.6 Styrning och reglering

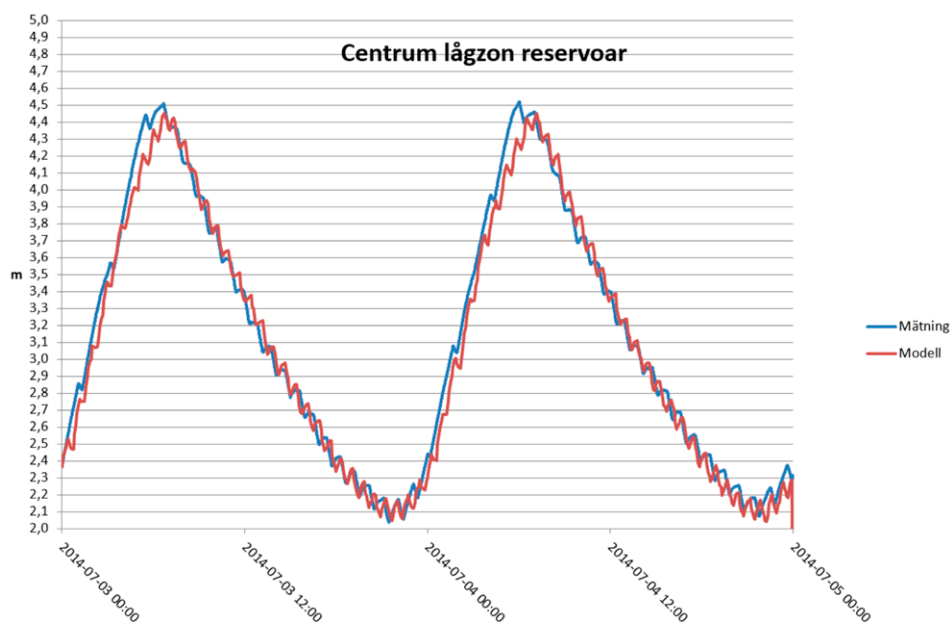
Styrning och reglering av pumpar, ventiler, mm i modeller är ofta enkla och kan bestå av OM-villkor, till exempel OM nivån i reservoaren är över 4,5 m stannar pump 2. Händelser kan också aktiveras vid bestämda klockslag eller vid specifika tryck. Styrningar kan även göras mer avancerade med flera villkor som ska samverka, till exempel OM klockan är mellan 13.00 och 15.00 OCH nivån i reservoaren är under 3,2 m ELLER fyllnadstiden understiger 2 timmar startar pump 1. Exempel på olika styrvillkor visas i Figur 8.1.

```
IF TANK A LEVEL > 5.50 THEN PUMP B STATUS IS CLOSED
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 10:00 PM OR SYSTEM CLOCKTIME <= 6:00 AM THEN PUMP C
STATUS IS CLOSED
IF TANK D LEVEL <= 2.60 THEN LINK E STATUS IS CLOSED
IF TANK F LEVEL < 1.19 AND TANK G LEVEL > 3.00 THEN LINK H STATUS IS OPEN
```

**Figur 8.1**

Exempel på styrvillkor.

Figur 8.2 illustrerar ett exempel där en pump styrs mot en kurva baserad på nivåvariationen i reservoaren vid normal dygnsmedelförbrukning i zonen. Styrkurvan justeras kontinuerligt mot ett börvärde som ändras var 20:e minut.



**Figur 8.2**

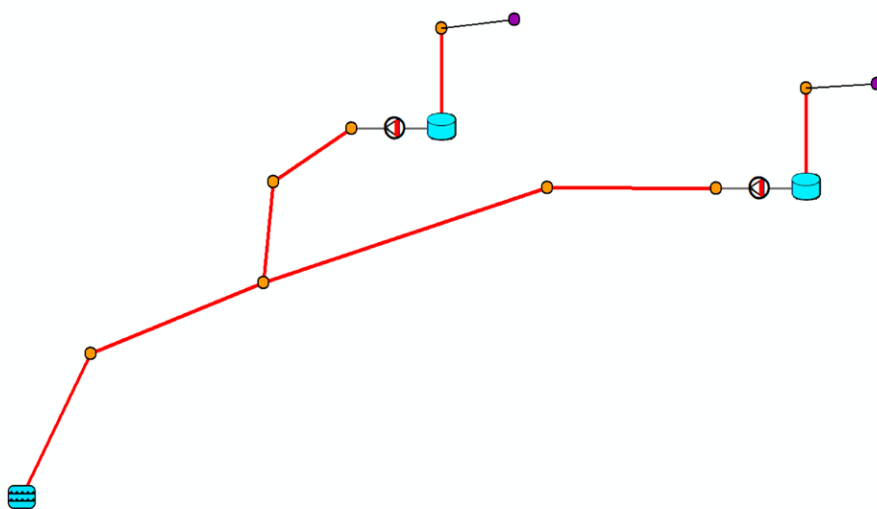
Exempel på reservoarnivå som resultat av avancerade styrvillkor med börvärde.

Avancerade villkor för styrning kan påverka modellens prestanda vid körningar, därför är det klokt att förenkla styrreglerna så långt det är möjligt utan att likheten med verkligheten förloras.

Säkerställ också att styrningar vid krislägen fungerar, till exempel att reservoarer stänger vid låg nivå om sådana funktioner finns.

## 9 Uppbyggnad av modell för tryckavloppsmodellering

Som nämnts i del 2 kan en hydraulisk modell användas både för att dimensionera eller kontrollera ett tryckavloppssystem som ska byggas men även för att undersöka funktionen hos ett befintligt system. Principen är att modellen byggs som en omvänd vattenmodell. Det vill säga att förbrukningen är negativ och randvillkoret är en fast vattennivå vid trycksläppspunkten.



**Figur 9.1**

Princip för tryckavloppsmodeller.

Modellen kan byggas med olika detaljeringsgrad beroende på vad som ska undersökas. Om problem med proppbildning, ledningsbrott eller tryckslag ska undersökas är det extra viktigt att ledningarnas höjdgeometri är rätt. Om frågorna gäller dålig lukt och uppehållstid kan ledningsprofilerna var mer schematiska så länge ledningslängden är korrekt.

Om modellen ska användas för att beräkna transienter i syfte att utreda tryckslag är det viktigt att ledningsmaterialet och rörtjockleken är rätt men om modellen endast ska användas för flödesberäkningar räcker det med att innerdiameter och råheter finns med.

### 9.1 Randvillkor

I kapitel 4.2 har uppbyggnaden av en hydraulisk modell över ett tryckavloppssystem beskrivits översiktligt. I avsnitten nedan beskrivs förutsättningarna för randvillkoren mer ingående.

#### 9.1.1 Inflöde (förbrukning)

Flödesbelastningen i modellen anges på samma sätt som vattenförbrukningarna i en vattennätsmodell men med negativa flöden eftersom de ska gå in till modellen i stället för ut ur den.

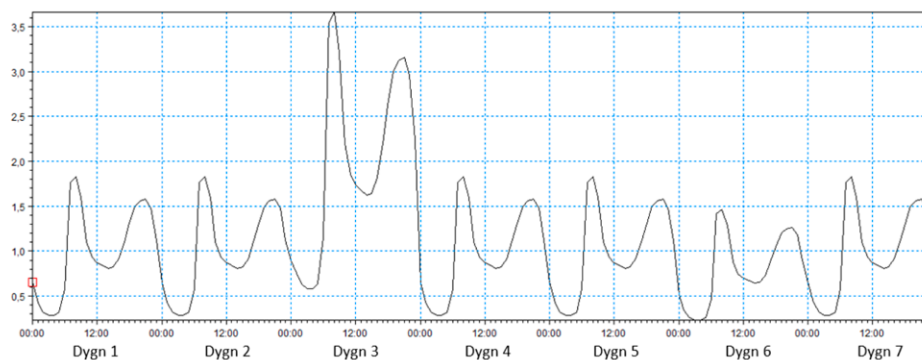
För ett tryckavloppssystem i ett allmänt avloppsnät ska tillrinningen till varje station vara så korrekt som möjligt. Flödet består förmodligen inte bara av spillvatten utan även av ett basflöde av läck- och dränvatten från uppströms liggande självfallssystem. Flödet

kan även vara nederbördspåverkat. Det får i så fall läggas in som ett tidsstyrt flöde. I de modelleringsprogram som normalt används för modellering av trycksatta ledningsnät går det inte att simulera regnberoende flöden. Om det till exempel är en kapacitetsutredning för en regnpåverkad pumpstation som ska göras är det bättre att bygga modellen i ett program för självfallsnät som även kan modellera trycksatta ledningssträckor.

När det gäller LTA-system räcker det att förbrukningen för respektive pumpstation i systemet antas. Det är dock viktigt att fördela förbrukningarna på ett sätt så att stationerna får så slumpmässiga starttider som möjligt. De flesta hydrauliska modelleringsprogram saknar funktioner för slumpmässiga händelser. En slumpmässigt fördelad förbrukning och ursprunglig vattennivå i sumparna måste därför skapas. Om alla stationer i en LTA-modell ges samma initiala vattennivå i sumpen, samma förbrukning och samma mönster kommer alla pumpar att starta och stanna samtidigt och det är inte ett rimligt scenario.

Ett sätt att variera förbrukningen för stationerna är att fördela antalet personer som belastar stationerna i en LTA-modell så att de varierar mellan 1 och 5 boende/station. För att få en så slumpmässig fördelning som möjligt kan stationerna till exempel sorteras efter sista decimalen på X-koordinaten innan belastningsflödena delas ut. Det kan även finnas anledning att styra hur förbrukningarna fördelas över modellen. I vissa fall kan det vara intressant att till exempel placera en låg förbrukning längst ut i systemet. Det medför att uppehållstiden i ledningsnätet förhoppningsvis räknas på säkra sidan.

För att totalförbrukningen ska bli rätt bör antalet personer som belastar systemet stämma överens med verkligt antal. Om lokal statistik saknas kan antaganden göras utifrån rekommendationer i P114. Dygnsvariationer och faktorer för maxdygn och mindygn finns i SVU-rapporten 2020-7 (Hammarlund et al. 2020). Det är lämpligt att simulera en period som innehåller både ett maxdygn och ett mindygn. Maxdygnet testar då systemets kapacitet och mindygnen visar vattnets uppehållstid i systemet vid lågförbrukning vilket är intressant när risk för svavelvätebildning utreds. I Figur 9.2 visas ett exempel på förbrukningsvariation för spillvatten under 7 dygn med ett maxdygn och ett mindygn.



**Figur 9.2**

Exempel förbrukningsvariation under 7 dygn där Dygn 3 är ett maxdygn och dygn 6 är ett mindygn.

### 9.1.2 Trycksläppspunkten

Det vanligaste är att tryckavloppssystemet mynnar i en brunn i ett självfallssystem. I modellen beskrivs trycksläppspunkten enklast som en reservoar med fast trycknivå.

## 9.2 Tryckavloppssystemet

### 9.2.1 Ledningsnätet

Ledningsnätet i en tryckavloppsmodell fungerar på samma sätt som i en vattennätsmodell. Om modellen avser ett befintligt system som finns dokumenterat i en ledningsdatabas importeras ledningsnätet på samma sätt som en vattennätsmodell. Om modellen



---

gäller ett LTA-system som inte ägs av en kommunal VA-huvudman är det stor risk att dokumentationen är knapphändig. Det går dock att skapa en bra modell som ger tillförlitliga resultat även om ledningsunderlaget består av handritade skisser så länge de återspeglar den verkliga anläggningen och ledningsdimensionerna är kända. Det går även att mäta in ventiler och LTA-stationer, men det är tveksamt om det är värt kostnaden.

Om systemet som ska modelleras inte är byggt än får projekteringsritningar eller planeringsskisser användas som underlag.

Höjdsättningen görs enklast utifrån höjdmodell över befintlig eller framtida markhöjder. Höjddata kan även hämtas från NNH.

### 9.2.2 Pumpsump

Pumpsumparna i en tryckavloppsmodell beskrivs som reservoarer med variabel vattennivå. Det är inte viktigt att beskriva geometrin helt korrekt så länge volymen mellan start- och stoppnivån är korrekt. Om start- och stoppnivåerna är kända bör de naturligtvis användas i modellen. Om det saknas nivåuppgifter om start och stopp måste rimliga antaganden göras. För pumpstationer i allmänna ledningsnät kan startnivån antas ligga nära vattengången på inkommande självfallsledning. För LTA-stationer kan ungefärliga nivåer för start och stopp oftast erhållas från pumpleverantörerna som avstånd till markytan.

På samma sätt som förbrukningen i LTA-system ska fördelas så slumpmässigt som möjligt mellan stationerna är det viktigt att initialnivån i stationernas sumpar slumpas fram. Det kan till exempel göras genom att den väljs utifrån sista decimalen i Y-koordinaten enligt formeln nedan.

Formel 9.1 Initialnivå i pumpsump.

$$h = \text{stoppnivå} + (\text{startnivå} - \text{stoppnivå}) * \frac{y}{10}$$

y= sista decimalen i Y-koordinaten

### 9.2.3 Pumpar

Information om pumptyp hämtas från ledningsägaren som även kan ha tillgång till pumpkurvor för pumparna. I annat fall får pumpkurvor hämtas från pumpleverantörerna.

LTA-system kan vara uppbyggda med antingen cirkulationspumpar eller förträngningspumpar. Cirkulationspumpar arbetar med ett måttligt tryck och ett högt flöde medan förträngningspumpar arbetar med högre tryck och lägre flöden. Det är sällan lyckat att blanda de två typerna av pumpar i samma system. Eftersom de olika pump-typerna har så olika egenskaper kommer ledningsnäten att utformas på olika sätt. Ett ledningsnät med cirkulationspumpar kräver större dimensioner än ett ledningsnät med förträngningspumpar.

### 9.2.4 Styrning av pumpar

Normalt styrs pumparna i ett tryckavloppssystem endast av nivån i pumpsumpen. Om start- och stoppnivåerna är kända bör de användas för att få rätt statisk uppföringshöjd för pumparna. Det är framför allt viktigt i ledningsnät för centrifugalpumpar där även ett litet fel på mottrycket kan leda till att pumpkapaciteterna blir kraftigt överskattade eller underskattade eftersom driftpunkten hamnar fel på pumpkurvan. För ett tryckavloppssystem i ett allmänt ledningsnät kan det vara värt att mäta in start och stoppnivåer om de inte är kända. I ett LTA-system är det knappast värt att göra det för samtliga stationer eftersom arbetet är tidskrävande om det är många stationer. Som nämnts tidigare kan ungefärliga nivåer för start och stopp i LTA-stationer oftast erhållas från pumpleverantörerna som avstånd till markytan.

---

För tryckavloppssystem i det allmänna ledningsnätet kan det finnas avancerade styrningar som reglerar pumparnas starter så att pumparna inte ska gå samtidigt i onödan. Det bör kontrolleras innan modellen byggs upp. Normalt styrs dock start och stopp av nivån i sumpen.

Det finns LTA-system där pumparnas start och stopp inte styrs av nivåer i sumpen utan är slumpmässiga och även har en viss självlärande funktion. Det går inte att simulera, men om man vill öka slumpmässigheten ytterligare i modellen kan olika stationer ges olika volym mellan start och stopp.

#### **9.2.5 Förluster i ledningar**

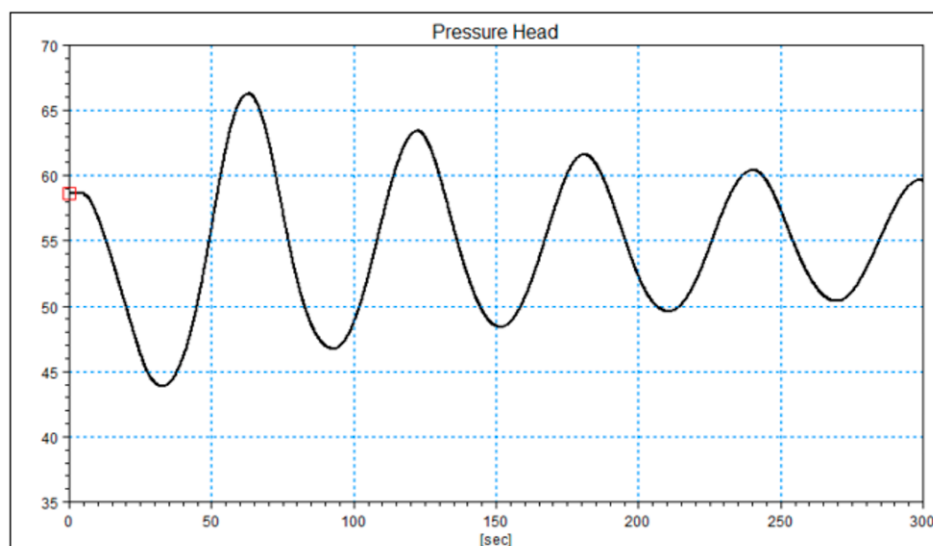
Tryckförlusterna i systemet beskrivs normalt endast av friktionsförlusterna i ledningarna. När råheten för ledningarna väljs ska hänsyn tas till att ledningsskarvar, ventiler, krökar och kopplingar också orsakar förluster. Råhetstalet bör alltså väljas högre än vad som hade varit fallet om man endast tagit hänsyn till själva röret. I Bilaga C redovisas ekvivalenta råhetstal för olika ledningsmaterial.

Det kan vara värt att poängtera att tryckförlusterna alltid är blygsamma vid låga vattenhastigheter. Men när vattenhastigheterna blir höga kommer valet av råhetstal att kraftigt påverka trycket i systemet vilket i sin tur påverkar pumparnas kapacitet.

# 10 Uppbyggnad av modell för transientberäkning

## 10.1 Grundläggande krav på en modell för transienta beräkningar

Transienta beräkningar är betydligt mera tidskrävande än stationära beräkningar. Därför bör en modell för transienta beräkningar som utgår från en modell för stationära beräkningar förenklas och renodlas, detta underlättar också felsökning. Det bör inte vara för tätt mellan beräkningsnoderna, därför kan det vara svårt att använda en stationär modell som kanske gjorts direkt från ett databasutdrag. Det finns ett förhållande mellan tidssteget i beräkningen och kortaste ledningslängden i modellen. Ju kortare ledningar som finns i modellen desto kortare beräkningstidssteg måste väljas i beräkningen för att få ett korrekt resultat. Ju kortare tidssteg som används vid beräkningen desto längre blir beräkningstiden. En bra ansats är att sätta beräkningstidsstegets längd till 0,1 s, för att därefter justeras efter behov. Simuleringstiden bör väljas så att resultatet kan betraktas över flera svängningsperioder då mönstret upprepas och amplituden klingar av, se Figur 10.1.



**Figur 10.1**

Exempel på tryckvariation med avklingande amplitud vid transientberäkning.

De största tryckvariationerna uppstår alltid direkt efter den utlösande händelsen. En period,  $T$  (s) kan beräknas som  $4L/a$ .  $L$  är ledningslängden mellan händelsepunkten och reflektionspunkten,  $a$  är tryckvågens utbredningshastighet i det aktuella ledningsmaterialet. I PE-ledningar är  $a$  ca 300 m/s, i PVC ca 500 m/s och i stål ca 1300 m/s. Utbredningshastigheten kan beräknas med kännedom om materialets elasticitetsmodul, dimension och godstjocklek (beräkningsformel finns i VAV P58). Om beräkningen ska fortgå tills alla variationer klingat ut kan beräkningstiden bli mycket lång.

---

## 10.2 Randvillkor

Randvillkor utgörs av en inmatning av vatten, ett utflöde av vatten eller en reservoar.

Inmatningen kan ske med hjälp av en pump eller som ett flöde (negativ förbrukning). Om inmatningen beskrivs som ett flöde kan detta kopplas till en tidsserie med godtycklig variation och även att det avslutas på önskat sätt. Här är det möjligt att efterlikna hur en pump stannar av vid naturligt stopp eller efter ett strömavbrott. Likaså en förbrukning, och hur den startar eller upphör, kan styras med en tidsserie. Här är det typiskt att efterlikna hur snabbt en ventil kan tänkas stänga, manuellt eller med motordrift. Hur snabbt ett flöde påbörjas eller avslutas är tillsammans med ledningslängden avgörande för hur kraftig en tryckvariation blir.

Tryckvågen reflekteras mot en rörände i ett slutet system eller en reservoar i ett öppet system. Ett utlopp i en tryckavloppsledning kan beskrivas som en reservoar i nivå med utloppet (släppunkten). En reservoar kan beskrivas med en specifik volym som påverkas av flödet mot densamma, eller som en fast trycknivå där volymen är oändlig och inte påverkas av det föränderliga flödet i ansluten ledning. Valet påverkar inte tryckamplituden.

## 10.3 Ledningar

Utöver den information som finns i den stationära modellen krävs även uppgifter om tryckvågens utbredningshastighet i det aktuella ledningsmaterialet. Om inte programmet räknar ut detta själv med hjälp av inlagda uppgifter krävs i stället utbredningshastigheten som indata för alla ledningar. Ledningar med lågt råhetstal (glatta rör) har mindre begränsande effekt på tryckvariationerna än ledningar med högt råhetstal. För en beräkning som ska visa på värsta fallet ska alltså ett lågt råhetstal väljas vilket bättre speglar en ny ledning än en gammal ledning.

## 10.4 Noder

Beräknat tryck redovisas i alla angivna noder. Kravet på indata skiljer sig inte från det som krävs för en beräkning med stationära förhållanden. Den förbrukning som angivits i noden som startvärde följer sedan med under hela beräkningen. Detta kräver alltså att vatten kan komma in i systemet från ett randvillkor som innefattar denna möjlighet. En profil ska ha tillräckligt bra upplösning så att högsta och lägsta punkterna blir korrekt representerade.

## 10.5 Skyddsåtgärder

Skydd mot skadliga tryckvariationer kan delas upp i sådana åtgärder som förhindrar, eller begränsar, uppkomsten av tryckslag och i sådana åtgärder som lindrar effekten av uppkomna tryckslag.

Alla åtgärder som minskar hastigheten i flödesförändringar minskar tryckslaget. Typiskt är varvtalsreglerade pumpar med långsam uppstart eller nedstängning, eller långsammanövrerade ventiler med lång tid för öppning och stängning. Dimensionerande fall blir dock ett strömavbrott när till exempel en varvtalsreglering sätts ur spel och en pump stannar hastigt, eller när en ventil stängs mycket snabbt. Att i modelleringsprogrammet kunna beskriva hastigheten i en flödesförändring måste därför vara möjligt vid transient modellering.

---

En tryckklocka är den vanligaste och mest robusta anordningen för begränsning av tryckslag. Den fungerar alltid, även vid strömavbrott, och hjälper både mot höga och låga tryck. Typiskt indata för en tryckklocka är total volym och fyllnadsgrad vid beräkningens start. Ju större klocka desto mer dämpning av uppkomna tryckslag.

Säkerhetsventiler, som släpper ut vatten vid högt tryck, och vakuumventiler som suger in luft vid undertryck kräver mer av modelleringsprogrammet. För beräkning av dessa funktioner krävs mer kraftfulla beräkningsprogram än de som normalt används för hydraulisk modellering av trycksatta ledningsnät. Leverantörer av fysiska tryckslagskydd har oftast egna beräkningsprogram och kan vara behjälpliga med transientberäkningar i specifika tillämpningar. Det finns även särskilda beräkningsprogram att köpa.

# 11 Kalibrering

## 11.1 Definition

Det är viktigt att komma ihåg att modeller är förenklingar av de distributionssystem de byggs att efterlikna. För att säkerställa att de ger tillförlitliga svar måste modeller i de flesta fallen kalibreras.

Kalibrering ingår tillsammans med validering i verifieringsproceduren, se Figur 11.1.

| Period: | KALIBRERING                                                                                            | VALIDERING                                                                                                                                             |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Jämförelse av beräknade och observerade värden<br>Justering av modellens parametrar<br>OK → Validering | Jämförelse av beräknade och observerade värden<br>Ej justering av modellens parametrar<br>OK → Modellen är validerad!<br>Ej OK → Åter till kalibrering |

Vid kalibrering anpassas modellen till uppmätt data i distributionssystemet. Uppmätta värden för en period jämförs med beräknade värden för samma period. Modellens parametrar justeras tills en så god överensstämmelse som möjligt erhålls. När justering är gjord görs en ny jämförelse.

När kalibreringen är klar jämförs beräknade värden med mätdata mot vilken kalibrering inte tidigare skett, det vill säga en annan period än den som kalibreringen avser. Någon justering av modellens parametrar ska inte göras vid valideringen.

Definitionen av verifieringsproceduren som beskrivs ovan visar att hydrauliska modeller oftast kalibreras men sällan valideras. Modellen jämförs normalt mot uppmätta värden, justeras och jämförs igen tills tillräcklig likhet uppnås. Men det är ovanligt att den kalibrerade modellen därefter jämförs med mätdata för en helt annan tidsperiod eftersom längre mätserier helt enkelt saknas. Validering av en modell ger generellt inte heller en sådan kvalitetshöjning att det är värt det extra arbetet. Därför används fortsättningsvis termen kalibrering om arbetet med att kvalitetssäkra modeller i denna rapport.

**Figur 11.1**

Verifieringsproceduren enligt VA-Forsk Rapport 2000-07 (Granlund och Nilsson 2000).

## 11.2 Insamling av mätdata

### 11.2.1 Val och kontroll av mätplatser

Det är en god idé att tidigt i modellarbetet planera för mätningar så att de kan genomföras med hänsyn till årstid då tillgänglighet till mätplatser och temperatur kan vara försvårande omständigheter vintertid. En plan ska upprättas där mätplatserna markeras på en karta. Om mätningar ska utföras i flera omgångar visas även ordningen för mätningarna. Då vissa mätplatser, främst brandposter, kan visa sig vara olämpliga eller obrukbara bör alternativa mätplatser identifieras i förväg. Det rekommenderas att alla mätplatser besiktas innan mätarna placeras ut. Ju fler mätare som placeras ut desto större är möjligheten att få en bra kalibrering av modellen.

Alla mätplatser som avser tryck- och nivåmätning bör mätas in med stor noggrannhet för att säkerställa att mätdata utgår från rätt plushöjd. När äldre ritningar över reservoarer och anläggningar används som underlag är det också viktigt att kontrollera om höjdsystemet är samma idag som när ritningarna upprättades.

### 11.2.2 Generellt om genomförande av mätningar

Mätperioden bör sträcka sig över minst en veckas tid. Om tillgången till mätare är begränsad får mätningen göras i omgångar. Uppdelningen görs då geografiskt, lämpligen indelat i olika tryckzoner. Upplösningen på mätningarna bör vara en (1) minut om

det är möjligt och gärna tätare för mätningar vid tryckstegringar med korta drifttider.

Det bör också observeras att tryckmätare oftast är känsliga för frost och mätningar därför helst bör utföras under frostfria förhållanden. De måste annars isoleras, till exempel vid placering i brandposter.

Inför alla mätningar ska klockan kontrolleras i alla system så att tiden överensstämmer i samtliga mätare och i styr- och övervakningssystemet. Mätare och system kan hantera övergången mellan sommar- och vintertid olika och vissa system är alltid inställda på normaltid (vintertid).

Det rekommenderas starkt att den som upprättar modellen även är delaktig i att utföra mätningarna eftersom risken för missförstånd och felaktiga slutsatser annars är mycket stor.

### 11.2.3 Mätdata från styr- och övervakningssystem

Mätdata hämtas ofta från olika styr- och övervakningssystem och det är viktigt att i god tid försäkra sig om att dessa data har tillräcklig upplösning, att mätarna visar korrekta värden samt att det går att ta ut tillräckligt långa dataserier. Det är också viktigt att sätta sig in i var mätaren är placerad och exakt vad den mäter då kunskapen bland driftpersonalen inte alltid är heltäckande.

Mätning av reservoarnivåer sparas oftast i styr- och övervakningssystemet och data kan då exporteras därifrån. Då det finns risk att givarens placering ändras vid underhåll eller givarbyte och värden från en givare med tiden kan driva iväg måste tryckgivarens placering i reservoaren kontrolleras.

En punkt i anslutning till reservoarluckan mäts in och genom nedmätning kontrolleras avståndet till vattenytan och om möjligt till botten. Vid jämförelse med data från styr- och övervakningssystemet vid samma tidpunkt kan en korrektionsfaktor tas fram som omvandlar driftdata till exakt nivå från botten.



**Figur 11.2**

Inmätning av plushöjd på reservoar.

Finns ingen loggning av nivå måste befintlig givare anslutas till en portabel logger och saknas nivågivare måste en sådan monteras.



#### 11.2.4 Tryckmätning med portabel utrustning

Valet av antal mätpunkter vid tryckmätning begränsas ofta av tillgången till mätare och lämpliga mätplatser. Mätare ska först och främst placeras längs huvudledningar mellan vattenverk eller tryckstegringar och reservoarer för att ge ett bra underlag för en grundläggande kalibrering. Om det därefter finns fler mätare att tillgå kan de placeras i områden som ligger högt och lågt i tryckzonen för att se om trycket tillfälligtvis eller ofta under- eller överstiger de rekommenderade värdena.



**Figur 11.3**

Montering av tryckmätare i brandpost.

Vid utplacering av en tryckmätare ska ett mätprotokoll alltid fyllas i som minst anger följande:

- Mätplatsens namn enligt ledningskartan.
- Vilken mätare som använts.
- Vilket intervall mätaren är inställd att logga värden.
- När mätaren sattes ut och när den togs in.
- Den inmätta plushöjden på mätaren enligt det höjdsystem som används för modellen.

Exempel på mätprotokoll finns i Bilaga D.

Det är mycket viktigt att plushöjden för tryckmätarnas placering mäts in så att trycket kan omvandlas till rätt trycknivå vid kalibreringen.

#### 11.2.5 Tappningsprov med portabel utrustning

För att få underlag för tryckförlustkalibrering krävs en driftsituation med hög belastning där flödet är känt. Det kan till exempel ske under uppfyllnadsperioder för högreservoarer via pumpning under nattetid när förbrukningen är mycket låg. Det kan även åstadkommas under mätperioden genom tappningsprov. Ett antal brandposter öppnas då var för sig samtidigt som flöden och tryckförändringar mäts.

Det kan också utföras specifikt för en ledningssträcka där stora tryckförluster misstänks. Sträckan isoleras då genom ventilstängningar så att ett större flöde styrs till den aktuella ledningen. Uttagsflöde och tryckfall längs med sträckan mäts.





**Figur 11.4**

Tappningsprov i brandpost.

Lämpligen öppnas brandposten till hälften under fem minuter, eller tillräckligt länge för att mätarna ska registrera tryckförändringen, samtidigt som flödet mäts. Därefter öppnas brandposten ytterligare och proceduren upprepas. Genom att göra mätningen i två steg kan det göras en bättre uppskattning av basflödet (andra uttag) som varit under tiden för tappningsprovet.

Mätdata från tappningsprovet används för att rita upp en tryckprofil över sträckan så att problemområdet kan ringas in och studeras närmre.

Det är bra att tänka på risken för att abonnenter drabbas av missfärgat vatten vid dessa typer av tappningsprov. Det är även lämpligt att planera för det tappade vattnets avrinning så det inte orsakar problem i trafiken eller på kringliggande mark.

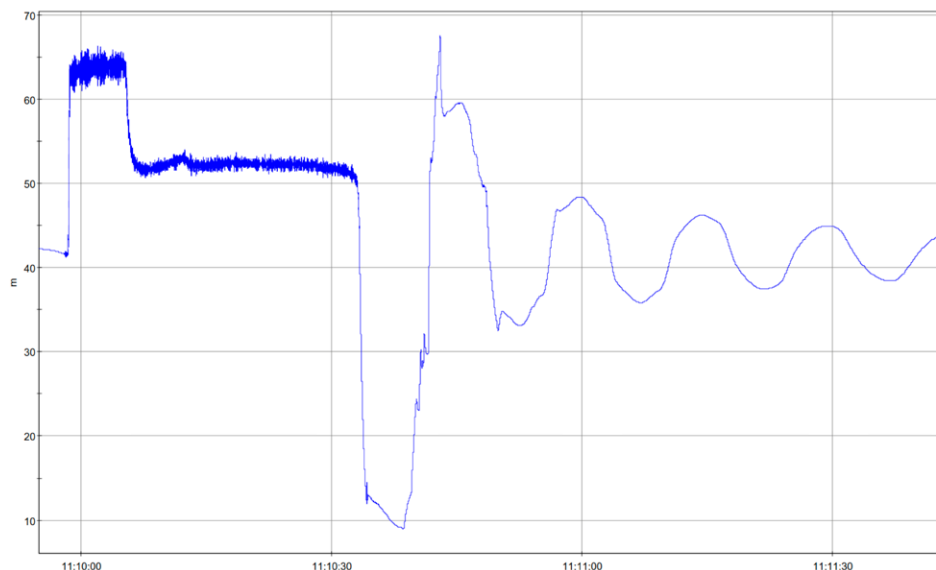
### 11.2.6 Flödesmätning med portabel utrustning

Det vanligaste är att flöden i trycksatta system mäts med permanenta flödesmätare som redan finns. Om permanenta flödesmätare saknas och det finns möjlighet att använda en portabel mätare är det lämpligt att göra det. Det är till exempel nödvändigt att mäta flödet som går in i ett vattendistributionsnät för att kunna ställa upp en flödesbalans. På samma sätt är det värdefullt att mäta pumpkapaciteten tillsammans med mottrycket för större pumpstationer i ett tryckavloppssystem. Den vanligaste typen av portabla flödesmätare för trycksatta ledningar är så kallade clamp-on-mätare som sätts utanpå ledningen och registrerar vattenhastigheten med hjälp av ultraljud. För att mätningen ska bli korrekt krävs en tillräckligt lång raksträcka. Olika tillverkare ställer olika krav på längden för den ostörda raksträckan före och efter mätaren, men en tumregel är att sträckan före mätpunkten ska vara minst 10 gånger rördiametern och sträckan efter ska vara minst 5 gånger rördiametern. För att kunna räkna om hastigheten till flöde krävs även att rörets innerdiameter är känd. Tekniken fungerar inte på alla typer av rörmaterial.

Om det finns flödesmätare med tillförlitlig noggrannhet installerade i systemet men data inte loggas med rätt upplösning kan en portabel logger kopplas in under den aktuella mätperioden så att informationen sparas i ett lämpligt format och med lämplig upplösning.

### 11.2.7 Tryckslagsmätning med portabel utrustning

Mätning av tryckslag eller transienta förlopp kan göras med tryckgivare som klarar att mäta och spara data med mycket korta intervaller. Tryckslag uppstår oftare i trycksatta avloppssystem än i vattensystem. Trycksatta avloppssystem innehåller generellt mindre volymer varifrån pumpning sker och antalet start och stopp är fler och mer abrupta.



**Figur 11.5**

Transient förlopp vid normalt pumpstopp i en avloppspumpstation.

## 11.3 Analys av mätdata

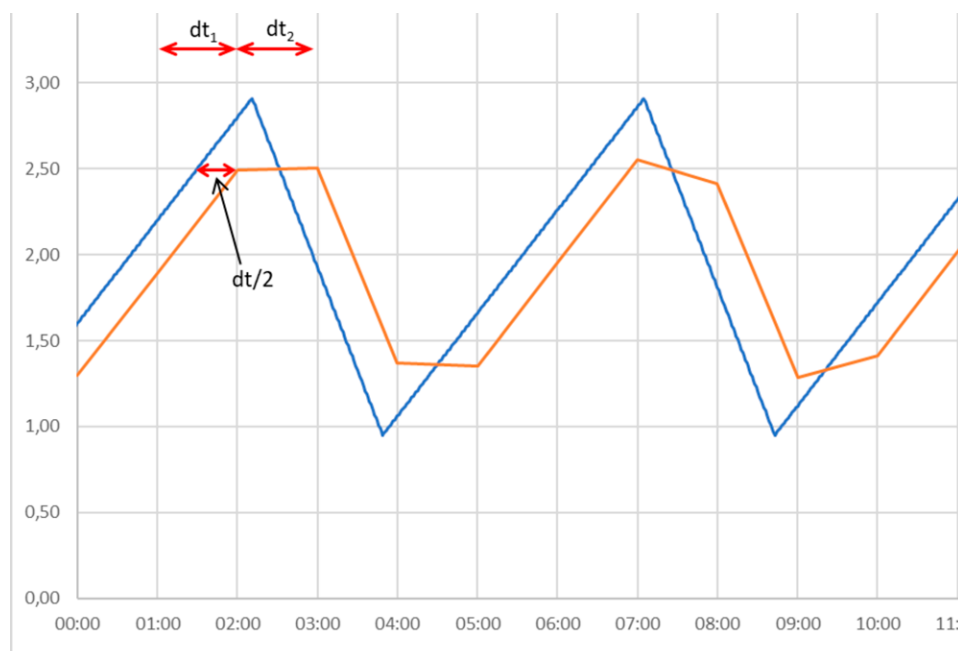
Inledningsvis väljs en tidsperiod ut, gärna en vecka eller mer, där data från tryckmätare, flödesmätare, nivågivare, etcetera finns och där inga onormala händelser som läckor eller liknande inträffat. Värt att tänka på i sammanhanget är också att förbrukningsmönster och styrning av system kan skilja sig åt mellan helg- och vardagar. Det är därför viktigt att mätningen fångar båda. I vissa system varierar förbrukningen kraftigt från dag till dag beroende på typen av verksamhet som bedrivs inom distributionssystemets område. Om så är fallet bör en längre tids mätningar analyseras för att fastställa veckomönstrets variation.

Inom VA-branschen används flera olika enheter för tryck, så som bar, kg och mvp. Vid arbete med och kalibrering av modellen bör enheten mvp (meter vattenpelare) användas. 1 bar motsvarar ca 10,2 mvp.

Flödesdata kan också erhållas i en rad olika enheter till exempel l/s, m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/timme och m<sup>3</sup>/dygn. Vid modellering av trycksatta system är det vanligast att flödet anges i l/s.

Data kan loggas på olika sätt. Loggningen kan innebära att ett momentanvärde som ges en tidsstämpel. Det kan också innebära att värden samplas under en viss period och att medelvärdet och/eller max- och minvärdet av samplingarna sedan sparas med en tidsstämpel. Det är viktigt att veta vad de loggade värdena representerar. När det gäller flödesdata är det inte så stor skillnad på att hantera momentanvärden och medelvärde för en tidsperiod. När det gäller nivåloggning i en reservoar kan det bli väldigt fel om medelvärden hanteras i tron att det är momentanvärden. Figur 11.6 visar en graf där skillnaden mellan momentanvärden och medelvärden, plottade som om det vore momentanvärden, framgår. Om in- och utflödet i reservoaren beräknas utifrån medelvärden kommer flödet att förskjutas en halv tidsperiod jämfört med det verkliga flödet. Det leder till systematiska fel när det beräknade flödet matchas mot uppmätta flöden i systemet. Även om tidsfelet uppmärksammas och korrigeras kommer volymerna vid

flödesvändningarna att missas. Eftersom loggning av medelvärden aldrig kommer få med toppvärden och bottenvärden kommer det framstå som om flödet till och från reservoaren vid vändningarna är lågt eller helt obefintligt. Det innebär att förbrukningen i mätområdet ömsom kommer överskattas och ömsom underskattas, eller rent av framstå som negativt. Om medelförbrukningen beräknas på en lång tidsperiod kommer felen troligen ta ut varandra. För reservoarer som har flödesvändningarna under samma timme varje dygn kommer felen dock att överlagras varandra. Det innebär att förbrukningsmönstret blir snedvridet så att en timme får för stor förbrukning och en timme för liten. Ju lägre tidsupplösning mätningen har desto värre blir felet.



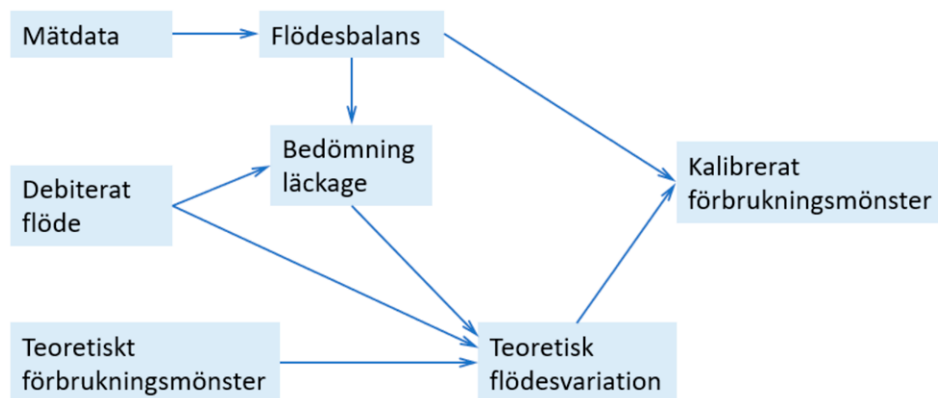
**Figur 11.6**  
Nivåvariation i högreservoar.

## 11.4 Flödeskalibrering av vattenmodeller

Vid upprättande av en vattenmodell är modellens flödesbelastning en lika viktig komponent som modellens ledningsnät. Det finns många metoder för att ta fram flödesbelastningen i ett distributionssystem och beroende på underlag och systemuppbyggnad kan de ha olika för- och nackdelar. Det är mycket viktigt att flödesbelastningens framtagande och tillämpning i modellen nogga dokumenteras.

Hur flödesbelastningen fastställs kan bero på vilket underlag som finns tillgängligt i det aktuella fallet. Abonentregister bör användas för att fördela flödesbelastningen över modellens noder och likaså uppställning av flödesbalanser för att beräkna faktisk förbrukning och läckage.

Arbetsgången med att sammanställa underlag och bearbeta data för att upprätta modellens flödesbelastning visas schematiskt i Figur 11.7. De olika komponenterna förklaras vidare i efterföljande avsnitt.



**Figur 11.7**

Arbetsgång med olika komponenter i modellens flödesbelastning

Med mätdata kan en flödesbalansberäkning upprättas för ett avgränsat område. Denna visar hur mycket vatten som faktiskt lämnat ledningsnätet inom området under en viss tidsperiod. Flödesbalansen används för att bättre bedöma läckaget samt kalibrera förbrukningsmönster.

Med debiterat flöde för abonnenter, teoretiska förbrukningsmönster samt en bedömning av läckage, kan en teoretisk flödesvariation för ett område skapas. Teoretiska mönster kan hämtas från P114 eller SVU-rapporten 2020-07. Ett teoretiskt mönster kan också hämtas från tidigare utförda beräkningar eller från mätningar i områden med liknande bebyggelse.

Vid kalibrering av förbrukningsmönster jämförs den teoretiska flödesvariationen med flödesbalansen varefter mönstren korrigeras.

Flödesbelastningen kan göras olika detaljerat. I sin enklaste form kan alla abonnenter ges samma förbrukningsmönster, men modellen kan också delas in i flera områden där olika abonnentkategorier får olika förbrukningsmönster. Hur detaljerat flödesbelastningen ska beskrivas är en avvägning mellan tillgängligt underlag, kvaliteten på underlaget, tidsåtgång samt vad det tillför modellens kvalitet och noggrannhet. Ett förbrukningsmönster kan till exempel beskrivas för 24 timmar och sedan repeteras över 7 dygn. Om det är frågan om abonnenter med sannolikt låg förbrukning under helg (exempelvis skola eller kontor) så kommer omsättningen överskattas under helgen. Om det är ett stort eller litet problem beror på vilka andra abonnenter som finns i området. Ett annat exempel är om det för ett område finns tydliga delområden med enbart bostäder och enbart kontor. Om då separata mönster tilldelas dessa kategorier så kommer simulerade flödesriktningar över dygnet sannolikt bli mer verklighetstroga, än om alla abonnenter har samma mönster.

I följande avsnitt beskrivs hur befintlig flödesbelastning i ett system beräknas. I framtida scenarier eller vid dimensionering kan en teoretisk, fiktiv, flödesbelastning behöva tillämpas. Detta är vidare beskrivet under avsnitt 12.3.

Modellens flödesbelastning ska ses som en helhet. Detta innebär att om modellens debiteringsregister uppdateras några år efter att en modell har upprättats, så bör även flödesbalans och mönster beräknas på nytt.

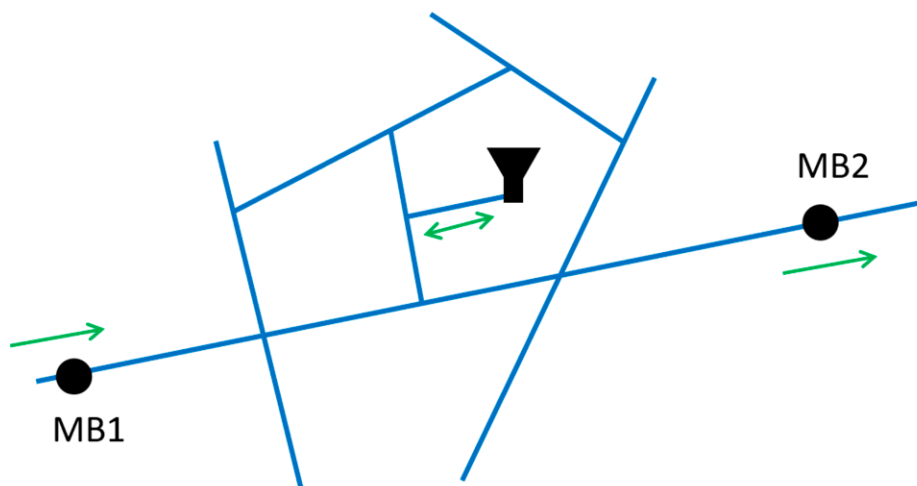
#### 11.4.1 Flödesbalans

Flödesbalanser ställs upp för olika mätområden inom ett distributionssystem. Områdena definieras utifrån hur avgränsningar kan göras med stängda ventiler och flödesmätare, det vill säga där flödesdata loggas till styr- och övervakningssystemet, alternativt punkter där det tillfälligt går att montera en portabel flödesmätare under en mätkampanj. Begreppet mätområde är inte synonymt med tryckzon även om de kan sammanfalla.

Flödesbalansen ställs upp som en volymbalans för varje tidssteg i mätningen. Differensen mellan inkommande flöden och utgående flöden i varje tidssteg är summan av förbrukning och läckage. I mätområden där det finns en reservoar måste flöde in och

ut från denna inkluderas i balansen. Om flödet till och från reservoaren inte loggas kan nivåmätning i reservoaren användas tillsammans med data för reservoarens geometri för att beräkna hur mycket vatten som gått in eller ut under ett tidssteg.

Ett exempel på ett mätområde visas i Figur 11.8. I detta exempel kan området avgränsas av två måtarbrunnar, vilka ger data om inkommande respektive utgående flöde från området. I området finns också en högreservoar vars volymförändring måste inkluderas i beräkningen. Flöde som lämnar ledningsnätet beräknas i varje tidssteg enligt Formel 11.1.



**Figur 11.8**

Exempel på mätområde för upprättande av flödesbalans.

Formel 11.1 Beräkning av flödesbalans för exempel i Figur 11.8.

$$Q_{\text{mätområde}} = Q_{MB2} - Q_{MB1} \pm Q_{\text{reservoar}}$$

Uppställning av flödesbalansen bör ske med mätdata som har max 10 minuter upplösning. Med lägre upplösning (längre tidssteg) kan det uppstå problem med att beräkna balansen på grund av händelser inom tidssteget, exempelvis start av pumpar för fyllning av en reservoar, se exempel i avsnitt 4.1.5 och 11.3.

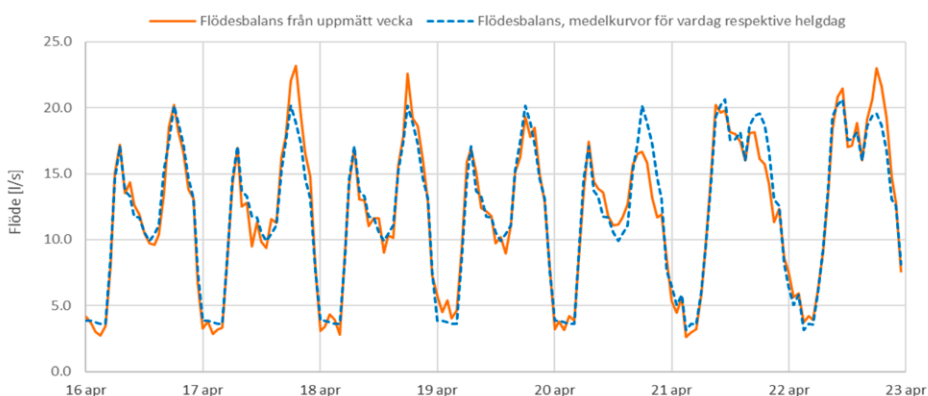
Upplösningen för förbrukningsmönstren som sedan används i modellen är normalt 1 timme. Det innebär att de förbrukningsflöden som räknats fram i flödesbalansen slås samman till timmedelvärde. Timmedelvärde kan tas fram enligt två principer:

Timmedelvärde beräknas för varje timme och dag. Detta innebär att resultatet exempelvis en tisdag kl. 7-8 är medelvärde av beräknad flödesbalans under tidsstegen mellan kl. 7 och kl. 8 samma tisdag. Denna metod är bra om flödesbalansen ska användas för exempelvis tryckkalibrering med mätdata från flera dagar och modellen behöver återge de olika dagarnas flöden korrekt.

Timmedelvärde beräknas för varje timme över alla vardagar respektive helgdagar. Detta innebär att resultatet exempelvis en tisdag kl. 7-8 är medelvärde av beräknad flödesbalans under tidsstegen mellan kl. 7 och kl. 8 för alla vardagar. Denna metod är bra om det är önskvärt att ta fram en "normal" flödesvariation för ett område.

Resultatet av de två principerna visas i ett exempel i Figur 11.9.





**Figur 11.9**

Flödesbalans för varje timme respektive dag (orange) och medelkurvor för vardag respektive helgdag (blå)

Det är rekommenderat att ställa upp flödesbalansen baserat på mätdata från minst två veckors mätning. Utförs flödesbalansen på enstaka dagar finns en risk att just de utvalda dagarna har haft stor förbrukningsavvikelse, ett ledningsbrott, fel på en mätare, eller annan avvikelse från normala förhållanden som gör att data inte är representativ och inte bör användas.

För att veta vilken period som är lämplig att upprätta flödesbalans för är det lämpligt att analysera dygnsmedelvärden för ett helt års produktion vid vattenverket. Om ledningsnätet inte matas direkt från ett vattenverk analyseras flödesdata från systemets inmatningspunkter. Om analysen visar stora säsongsskillnader kan det styra val av period för att upprätta flödesbalansen. Om det exempelvis rör sig om ett område med stor sommarturism och en flödesbalans upprättas med data från november kommer modellen sannolikt underskatta maximala flöden. Om ett ledningsnät med stora säsongsskillnader ska studeras kan det vara aktuellt att upprätta två flödesbalanser, en för hög- respektive en för lågsäsong, och därefter skapa två versioner av modellen för att analysera flöde- och tryckförhållanden för båda säsongerna.

När flödesbalansen har upprättats vet man hur mycket vatten som faktiskt lämnat ledningssystemet inom respektive mätområde. Detta används vid upprättande av modell för att få samma totala förbrukningskurva i modellen som i verkligheten för varje område. Inom området kan dock flöden oftast inte bestämmas närmre utan behöver fördelas teoretiskt. Det görs genom en bedömning av läckage samt en fördelning på abonnenterna i området, vilket avhandlas i efterföljande avsnitt.

#### 11.4.2 Abonnentregister

VA-huvudmannen har i normalfallet register över de abonnenter som är anslutna till distributionssystemet. Detta används vid debitering av vattenförbrukning och innehåller därför normalt vattenförbrukning för senaste året. Abonnentregistret kan användas för att distribuera flödesbelastningen över modellens noder.

För att kunna använda abonnentregistret behöver det ha koordinater för respektive abonnent. Ibland finns det redan i registret, men ofta måste registret matchas mot annan data för att koppla abonnemangen till koordinater så att det kan användas i modellarbetet. Efter inläsning av debiteringsregistret till modellen ska förbrukningarna kopplas till noder eller ledningar. Det är då viktigt att automatiserad koppling ses över så att överensstämmelse sker med abonnentens servisläge, vilket ofta kräver en hel del manuellt arbete. Det är inte ovanligt att förbrukningar kopplas till fel ledning eftersom det finns en närmre nod på den ledningen än på den ledning dit förbrukningarna skulle ha kopplats.

Om debiteringsregister med förbrukning saknas får förbrukningens andel av den producerade vattenmängden uppskattas utifrån flödesbalansen och sedan fördelas över systemets olika delar till exempel med hjälp av antal folkbokförda. Debiteringsregister med schablondebitering (inte mätt) kan också användas.

Beroende på vilken detaljnivå som valts kan sedan olika mycket komplettering av registret behövas. Normalt sker någon form av kategorisering av abonnenterna

efter typ av abonnent och geografisk placering (exempelvis "Hushåll, Förort 1" eller "Kontorsverksamhet", "Centrum").

Den geografiska kategoriseringen behöver stämma överens med använda mätområden i flödesbalansberäkningarna. Kategoriseringen sker därför normalt efter att flödesbalansen är gjord.

Vid kategorisering efter typ ska hänsyn tas till hur abonnenten normalt använder vatten under dygnet. En hushållsförbrukning har normalt toppar i förbrukningen morgon och kväll på vardagar och en mer samlad topp under dagtid på helger. Verksamheter kan däremot ha mycket olika förbrukningsmönster. Att kategorisera "Industri" kan vara vanskligt då förbrukningen varierar beroende på om verksamheten är i drift med normalt schema eller är igång dygnet runt. Kategorier ska därför så långt som möjligt väljas efter förmodat förbrukningsmönster.

Typkategoriseringen kan ibland göras med hjälp av debiteringsregistret då detta ibland har koder för exempelvis hushåll och verksamheter. Att göra typkategoriseringen kan innebära tidskrävande manuellt arbete beroende på vilket underlag som från början finns i abonnentregistret. Förenklingar är därför oundvikligt. Finns det inte information i registret som kan hjälpa kategoriseringen kan till exempel verksamhets- och bostadsområden kategoriseras grovt med hjälp av flygfoto eller karttjänster på internet. Kategoriseringen har större inverkan ju högre förbrukning en abonnent har. Kategoriseringen är därför viktigare för storförbrukare.

Kategoriseringen görs för att erhålla en god teoretisk flödesfördelning inom ett mätområde. Om mätområdet är antingen geografiskt väl blandat (exempelvis verksamheter är utspridda bland hushåll) eller mycket unisont (exempelvis innehåller bara hushåll) kommer kategoriseringen ha en mindre inverkan på flödesfördelningen. Det ger då mindre mervärde att lägga tid på detaljerad kategorisering eftersom modellens noggrannhet inte kommer öka nämnvärt av detta.

När kategoriseringen är klar kan abonnentregistrets debiterade vattenflöde summeras över mätområden och kategorier. Exempel visas i Tabell 11.1.

| Kategori \ Mätområde | Centrum [l/s] | Förort 1 [l/s] | Förort 2 [l/s] | Totalt [l/s] |
|----------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|
| Hushåll              | 7.4           | 12.4           | 6.5            | 26.3         |
| Verksamhet 8-16      | 5.1           | 1.5            | 5.4            | 12           |
| Verksamhet 24h       | 0             | 0              | 2.6            | 2.6          |
| Övrigt               | 5.3           | 1.4            | 3.2            | 9.9          |
| Totalt               | 17.8          | 15.3           | 17.7           | 50.8         |

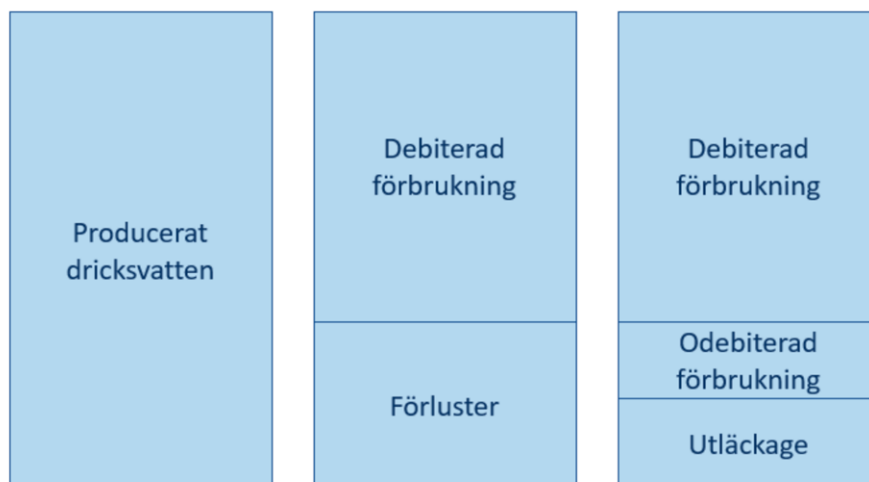
**Tabell 11.1**

Exempel på summering av abonnentregister över kategorier och mätområden.

Observera att viss information i debiteringsregistret eventuellt kan omfattas av allmänna dataskyddsförordningen (engelska: General Data Protection Regulation, GDPR). Det kan i undantagsfall leda till att ledningsägare inte lämnar ut all data som skulle varit av värde vid modelluppbyggnaden, till exempel abonnenttyp. Om så är fallet kommer modelluppbyggnaden ta extra lång tid.

#### 11.4.3 Läckage och odebiterad förbrukning

I alla dricksvattensystem finns en differens mellan den vattenmängd som produceras och den som levereras till abonnenterna. Dessa förluster kan definieras och delas upp på olika sätt. Ett av de enklare sätten är att dela upp den producerade vattenmängden i debiterad och odebiterad förbrukning samt utläckage. Detta illustreras i Figur 11.10. För ett avgränsat mätområde motsvarar producerat vatten den mängd vatten som blivit levererad till mätområdet.



**Figur 11.10**  
Uppställning förbrukning  
och förluster

Vid upprättande av en vattenmodell behöver differensen mellan producerad och debiterad vattenmängd som beräknats i flödesbalansen fördelas som odebiterad förbrukning och läckage. Andelen läckage i ett ledningsnät tas många gånger fram genom att jämföra årlig vattenproduktion vid vattenverk med årlig debiterad förbrukning. Detta är emellertid en viss förenkling, då den odebiterade vattenmängden kan innefatta en viss mängd förbrukning. Läckaget bör därför bedömas från flödesbalansen. På så vis bedöms också läckaget för varje mätområde och inte bara för ledningsnätet som helhet.

För att bedöma läckage studeras flödet nattetid i flödesbalansen. Ett lämpligt antagande är att ansätta läckaget till ca 90% av lägsta nattflöde i flödesbalansen. Om mätområdet som studeras innefattar industrier med betydande förbrukning nattetid kan detta dock inte tillämpas utan att den verkliga nattförbrukningen är känd.

Om exempelvis differensen mellan årlig vattenproduktion och årlig debiterad förbrukning ger ett högre flöde än vad som uppmätts nattetid, så är verkligt läckage sannolikt mindre och en del av differensen utgörs då av odebiterad förbrukning, se exempel i Figur 11.11. Om flödesbalansen visar betydligt högre nattflöde än den årliga differensen kan det misstänkas att det finns abonnenter som förbrukar vatten på natten alternativt att det finns läckage efter en eller flera vattenmätare. Läckaget bör inte vara större än vad den årliga balansen visar.

| <b>Distributionssystem X</b>                                                                                                                                                                                                                    |          |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--|
| Årsproduktion, medel                                                                                                                                                                                                                            | 14,1 l/s |  |
| Årsdebitering, medel                                                                                                                                                                                                                            | 11,2 l/s |  |
| Vattenbalans, 3 veckor i april                                                                                                                                                                                                                  | 16,7 l/s |  |
| Lägsta nattflöde                                                                                                                                                                                                                                | 1,6 l/s  |  |
| Bedömt läckage                                                                                                                                                                                                                                  | 1,4 l/s  |  |
| <i>Differensen mellan årsproduktion och årsdebitering är 2,9 l/s, men från beräknad vattenbalans kan ses att nattflödet är lägre än så. Läckaget bedöms därför till 1,4 l/s. I detta fall finns sannolikt betydande odebiterad förbrukning.</i> |          |  |

**Figur 11.11**  
Exempel uppskattning av  
läckage

I samband med framtagande av vattenmodell görs en sammanställning av beräknat läckage. Ofta beskrivs läckaget i procent av den totala producerade vattenvolymen. Detta kan vara ett användbart nyckeltal för egna verksamhetsmål etcetera, men är olämpligt vid jämförelse med andra ledningsnät. Ett bättre nyckeltal är då att beskriva läckaget per km ledning och dygn ( $\text{m}^3/\text{km}$ , dygn). I SVU-rapporterna 2011-12 och 2019-17 anges att ett "normalt" läckage i Sverige är ca  $5 \text{ m}^3/\text{km}$ , dygn (Malm et al. 2011, Malm et al. 2019).

Läckage behandlas mer ingående i SVU-rapport 2019-17.

När läckageflödet inom mätområdet har fastställts ska det fördelas in modellen. I de flesta modelleringsprogram finns det inbyggda funktioner som kan användas för att fördela läckaget. Fördelningen görs lämpligen med avseende på ledningslängd och innerdiameter. Material i kombination med ålder kan också användas som underlag



---

vid fördelningen av läckaget. Det kan till exempel vara motiverat om läckaget i ett mätområde är förhållandevis stort och en avgränsad del av områdets ledningsnät består av gamla ledningar av gjutjärn eller PVC och resten av nätet består av nylagda PE-ledningar.

#### 11.4.4 Förbrukningsmönster

I en modell ska förbrukningen fördelas både geografiskt och tidsmässigt för att modellen ska kunna simulera en utökad period. Genom att upprätta flödesbalans för ett mätområde vet man hur mycket vatten som lämnat ledningsnätet och hur detta varierat över tid. Med hjälp av koordinatsatt debiteringsregister kan förbrukning spridas ut geografiskt över området. Förbrukningens variation inom området över tid kan dock inte bestämmas utom om det skulle finnas mätning med hög tidsupplösning för samtliga abonnenter. Normalt paras därför abonnenterna ihop med antagna förbrukningsmönster, som sedan kan korrigeras för att passa beräknad flödesbalans (se kapitel 11.4.6).

Ett forskningsarbete har genomförts för att ta fram underlag på förbrukningsmönster för olika abonnentkategorier. Resultatet presenteras i SVU-rapport 2020-7 "Dimensioneringstal för vattenförbrukning" (Hammarlund et al. 2020). Mönster att använda i modellering kan hämtas härifrån. Mönster finns också i P114.

Förbrukningsmönster som tillämpas i modellering ska vara normerade (det vill säga medelvärdet av timfaktorerna ska vara 1,0). Vid korrigering av mönster mot flödesbalans kan detta ändras, vilket beskrivs i kapitel 11.4.6.

Om mätområdet innefattar abonnenter med mycket stora uttag kan det vara lämpligt att studera dessa noggrannare. Beroende på verksamhet kan en storförbrukare ta vatten kontinuerligt eller som korta, höga uttag. Förbrukningen kan också variera mellan olika årstider, vilket kan vara viktigt att ta fram. Detta kan påverka tryck- och flödesförhållanden i ledningsnätet. Ett samtal till aktuella storförbrukare kan ge vägledande information för att kunna ta fram en rimlig förbrukningskurva. Om en enskilds abonnents förbrukning bedöms vara kritisk för modellens resultat, ska mätning av abonnentens förbrukning övervägas.

Tillgängligheten av mätdata ökar med ny teknik och digitala uppkopplade vattenmätare blir vanligare också hos enskilda abonnenter. I framtiden kommer det sannolikt bli enklare att ta fram grundmönster för områden med hjälp av sådan mätdata. Det är värdefullt eftersom det kommer ge goda kunskaper om förbrukningsvariationer hos storförbrukare. I teorin skulle det vara möjligt att koppla varje abonnent med sitt individuella förbrukningsmönster. Det är möjligt att det i framtiden kommer program som kommer förenkla den ganska omfattande databashanteringen som krävs. Men för de idag mest använda modelleringsprogrammen är det lämpligare att använda mätning för individuella abonnenter som input till mönster per förbrukartyp och område, exempelvis genom att beräkna medelvärden för flertalet abonnenter och liknande.

#### 11.4.5 Teoretisk flödesvariation

Med hjälp av bedömt läckage, abonnentregister och teoretiskt förbrukningsmönster kan en teoretisk flödesvariation tas fram. Detta är ett initialt steg till kalibrering av förbrukningsmönster. Förväntad förbrukning för varje timme (i) beräknas genom att medelförbrukningen för varje kategori multipliceras med korresponderande timfaktor och adderas samman. Till det adderas bedömt läckage. Detta visas i Formel 11.2.

Formel 11.2 Beräkning av teoretiskt flöde per timme (i) genom att timfaktorer (a) multipliceras med medelförbrukning per kategori (Q) varefter läckaget adderas

$$\alpha_{1,i} * Q_{1,i} + \alpha_{2,i} * Q_{2,i} + \dots + \alpha_{n,i} * Q_{n,i} + Q_{\text{läckage}} = Q_{\text{teoretiskt},i}$$

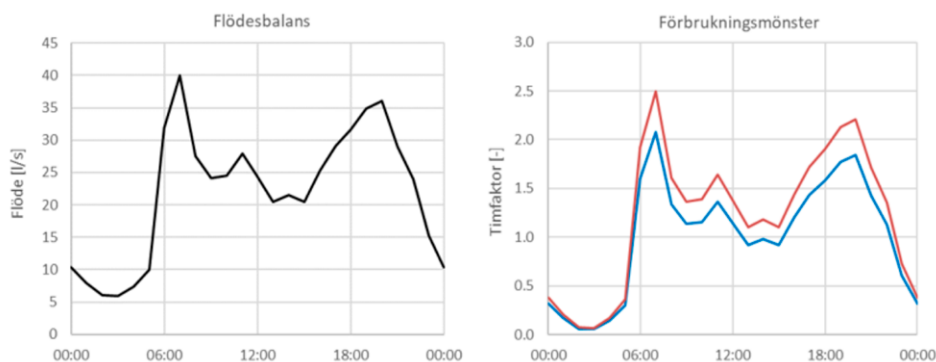
### 11.4.6 Kalibrering av förbrukningsmönster

Efter att flödesbalansen gjorts och abonnenternas medelförbrukning beräknats för varje kategori och mätområde, så krävs en korrigering av teoretiska grundmönster för att modellens flödesbelastning ska bli likadan som den beräknade i flödesbalansen.

Om det i flödesbalansen beräknats en högre förbrukning än vad som beräknats från debiteringsregister så kan det kompenseras enligt två huvudprinciper:

1. Modellens förbrukningar justeras med en skalfaktor och normerade mönster används
2. Mönstren korrigeras så att deras medelvärde blir samma som skalfaktorn (det vill säga inte längre normerade)

Den förstnämnda principen rekommenderas och beräkningsgången för denna redovisas nedan. Med denna metod erhålls ett normerat mönster som är representativt för abonnenterna i mätområdet och den utvalda perioden. Vid senare simuleringar med färdig modell, där till exempel framtida utbyggnad ska simuleras, kan då samma mönster användas för tillkommande bebyggelse. Med den andra metoden blir medelvärdet av mönstren samma som skalfaktorn i den första metoden. Figur 11.12 illustrerar skillnaden i förbrukningsmönster.



**Figur 11.12**

Förbrukningsmönster (höger) kalibrerade efter flödesbalans (vänster) enligt första metoden med skalfaktor (blå linje) och enligt andra metoden (röd linje)

Skalningsfaktor för att justera medelförbrukning enligt abonnentregister beräknas enligt i Formel 11.3.

Formel 11.3 Beräkning av skalningsfaktor

$$\frac{Q_{\text{förbrukning, flödesbalans}} - Q_{\text{läckage}}}{Q_{\text{förbrukning, debitering}}} = s$$

Med hjälp av bedömt läckage, abonnentregister och teoretiskt förbrukningsmönster samt skalfaktor beräknas teoretisk flödesvariation enligt Formel 11.4.

Formel 11.4 Beräkning av teoretiskt flöde med skalfaktor per timme (i)

$$(\alpha_{1,i} * Q_{1,i} + \alpha_{2,i} * Q_{2,i} + \dots + \alpha_{n,i} * Q_{n,i}) * s + Q_{\text{läckage}} = Q_{\text{teoretiskt},i}$$

Detta flöde jämförs med flödet beräknat med flödesbalansen. En kalibreringsfaktor beräknas per timme för att korrigera mönstren. Detta görs enligt Formel 11.5.

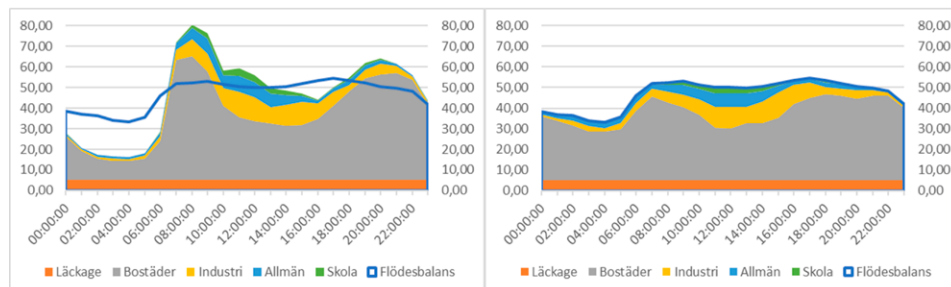
Formel 11.5 Beräkning av kalibreringsfaktor per timme (i)

$$K_i = \frac{Q_{\text{vattenbalans},i} - Q_{\text{läckage}}}{Q_{\text{teoretiskt},i} - Q_{\text{läckage}}}$$

Mönstren korrigeras med framtagen korrektionsfaktor. Samma faktor tillämpas på alla mönster i mätområdet för respektive timme. Detta görs enligt Formel 11.6 och ett exempel visas i Figur 11.13.

Formel 11.6 Korrigering per timme (i) och mönster (j)

$$\alpha_{j,i} * K_i = \alpha_{j,i,korr}$$



**Figur 11.13**

Korrigerad av förbrukningsmönster för att erhålla överensstämmelse med flödesbalansen.

Den teoretiska flödesvariationen kan beräknas med delvis uppmätta mönster, exempelvis för en stor industri. Denna kan då utelämnas i kalibrering. Korrektionsfaktorn beräknas och tillämpas då endast på övriga mönster.

#### 11.4.7 Exempel på beräkning av flödesbelastning

Nedan följer ett antal exempel som ska hjälpa läsaren att få ökad förståelse för de olika momenten i framtagande av flödesbelastning till en vattenmodell.

##### Exempel 1

Vid uppbyggnad av en modell har flödesbalanser beräknats. Medelflöde till ett mätområde har beräknats till ca 5,7 l/s. Abonnentregistrets summering för området visar att det innefattar hushållsförbrukare med medelförbrukning 4,4 l/s samt verksamheter med medelförbrukning 0,2 l/s. Då verksamheterna är utsprida i mätområdet och står för en relativt liten del av förbrukningen i området har samma förbrukningsmönster använts för alla abonnenter i mätområdet.

Differensen mellan flödesbalansens medelflöde och debiteringens medelflöde uppgår till ca 1,1 l/s. Enligt flödesbalansen är flödet nattetid som lägst ca 0,6 l/s. Hela differensen utgörs därför inte av läckage, utan läckaget bedöms till 0,5 l/s (ca 90% av lägsta nattflödet).

Efter att läckaget bedömts beräknas skalfaktor till 1,12. Medelförbrukningar enligt abonnentregister i modellen multipliceras sedan med denna faktor för det aktuella området.

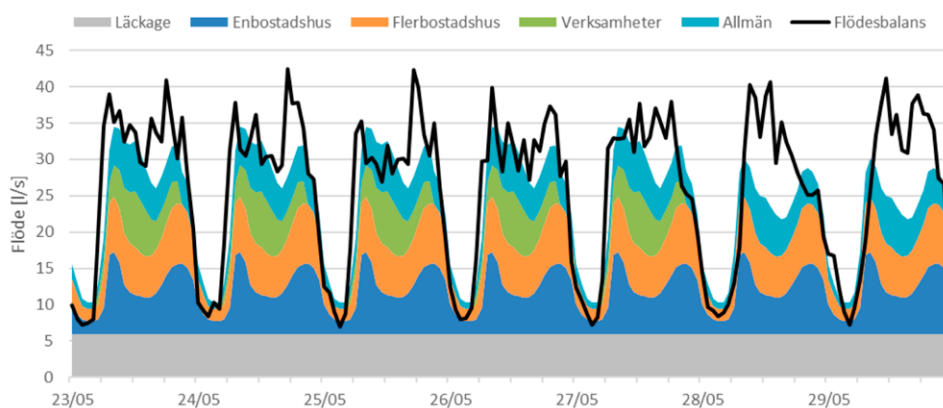
##### Exempel 2

Vid uppbyggnad av en modell har en flödesbalans upprättats för ett område. Medelflödet enligt balansen beräknas till 26 l/s. VA-huvudmannen har ett abonnentregister där fyra kategorier är definierade vilka används i modellen. Årsdebiteringen omräknad till medelflöde blir ca 6,2 l/s för enbostadshus, ca 5,6 l/s för flerbostadshus, ca 3,1 l/s för verksamheter och ca 4,1 l/s för allmänna ändamål.

Den totala summan av abonnenternas debitering uppgår då till ett medelflöde om 19 l/s. Beräknad flödesbalans från mätdata för området ger ett medelflöde om ca 26 l/s. Läckaget bedöms till ca 6 l/s, motsvarande knappt 90% av beräknat lägsta flöde i flödesbalansen.

Mönster ska tas fram för att modellen ska ge samma flödesbelastning som mätts upp för en viss vecka, då mätdata från samma vecka ska användas för tryckkalibrering av modellen.

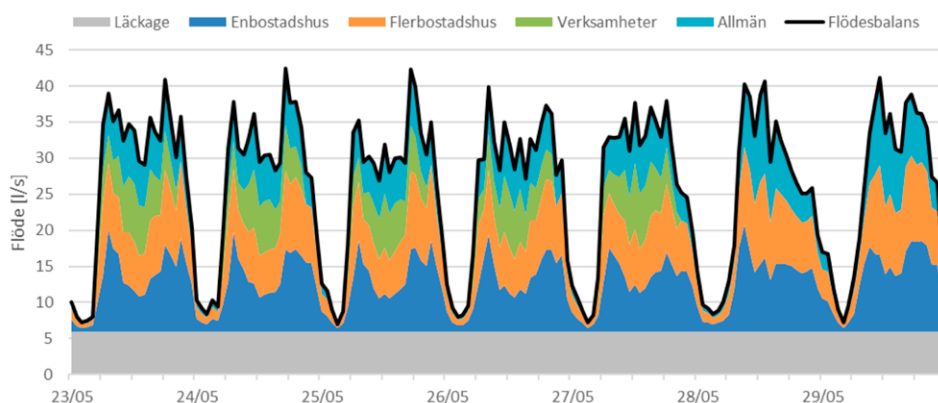
Teoretiska grundmönster för de fyra kategorierna tas fram och en teoretisk flödesvariation beräknas med hjälp av dessa grundmönster samt abonnenternas medelförbrukning. Denna flödesvariation jämförs med flödesbalansen i Figur 11.14. Generellt stämmer den teoretiska variationen relativt bra med undantag för helgen.



**Figur 11.14**

Teoretisk flödesvariation jämfört med flödesbalansen

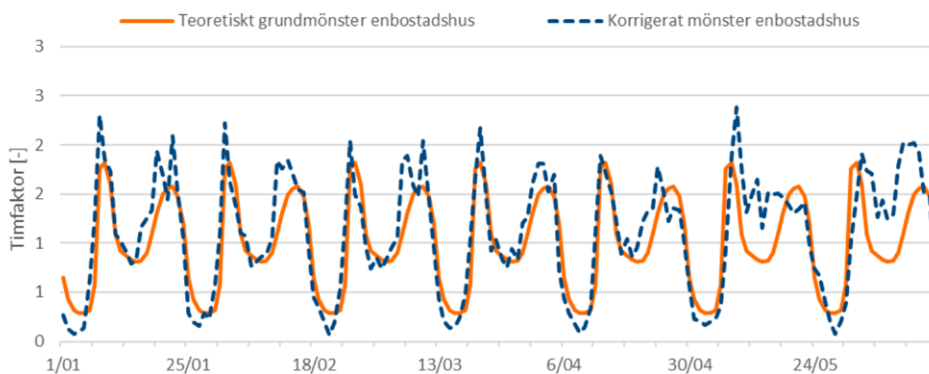
Efter korrigering av förbrukningsmönstren för de olika kategorierna ger de olika mönstren tillsammans med abonnenternas medelförbrukning samma flödesvariation som den uppmätta och beräknade flödesbalansen, se Figur 11.15. Observera att mönstren inte är normerade utan har en inbyggd skalning.



**Figur 11.15**

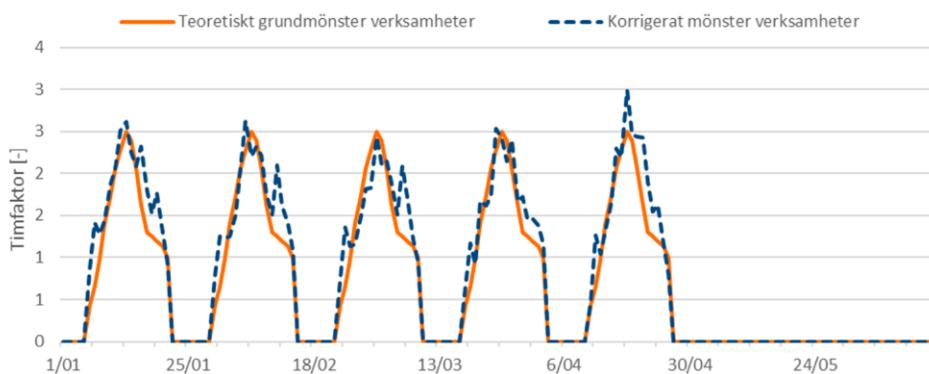
Flödesvariation jämfört med flödesbalansen efter korrigering av mönster

Teoretiskt och korrigerat förbrukningsmönster visas för enbostadshus i Figur 11.16 och för verksamheter i Figur 11.17. Medelvärdet för mönstret för enbostadshus blev ca 1,09 över veckan och för verksamheter 1,12 för vardagar men 0,8 om medelvärdet beräknas för hela veckan.



**Figur 11.16**

Teoretiskt och korrigerat förbrukningsmönster för enbostadshus



**Figur 11.17**

Teoretiskt och korrigerat förbrukningsmönster för verksamheter

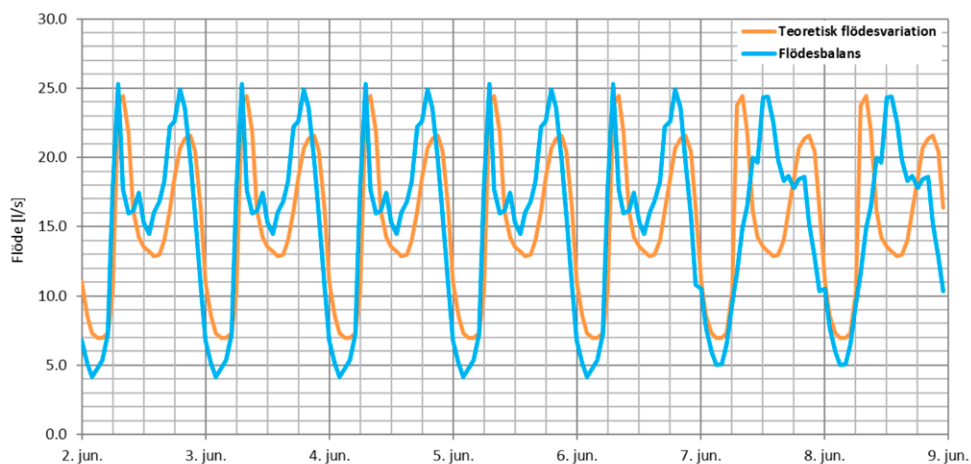
### Exempel 3

En flödesbalans har upprättats för ett område och ger ett medelflöde på ca 15,1 l/s. Då modellens mönster planeras användas till allmänna scenarioräkningar i både nutid och framtid så beräknas normalförbrukningskurvor för vardag och helgdag från flödesbalansen.

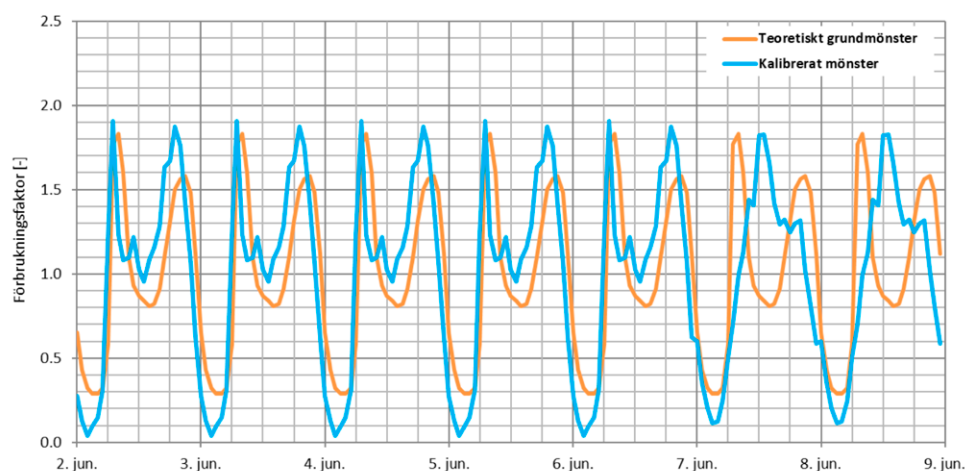
Abonnentregistret saknar tyvärr information som kan användas för att kategorisera abonnenterna. En översiktlig analys av flygfoto visar att området består av framförallt villaområden med få, spridda verksamheter. Det bedöms acceptabelt att tillämpa ett mönster för hela området utan att kategorisera abonnenterna.

Lägsta nattflöde uppgår till ca 4,1 l/s och läckage har därav bedömts till 3,7 l/s. Abonnentregistrets förbrukning för området summeras till ett medelflöde om 10,2 l/s. Differensen mellan flödesbalansen och läckaget blir 11,4 l/s och en skalfaktor beräknas således till 1,11.

Teoretisk flödesvariation jämförs med flödesbalansen i Figur 11.18 och teoretiskt och kalibrerat förbrukningsmönster visas i Figur 11.19.



**Figur 11.18**  
Teoretisk flödesvariation  
jämfört med beräknad  
flödesbalans



**Figur 11.19**  
Teoretiskt grundmönster  
och kalibrerat mönster  
(normerat)

## 11.5 Styrning och reglering

Vid kalibreringen ska reglering av pumpar, ventiler och andra anordningar som styrs av tryck i ledningsnätet eller nivåer i reservoarer kontrolleras och justeras så att de fungerar som tänkt.

## 11.6 Pumpar, ventiler och andra anordningar

Kontrollera att pumpar ger förväntade flöden och tryck enligt pumpkurvan samt att ventiler som reglerar tryck, flöde och riktning fungerar som tänkt.

Om mätning av flöde samt tryck före och efter pumparna har gjorts kan en pumpkurva tas fram ur mätdata-serien och användas i modellen. En sådan kurva beskriver pumpens verkliga kapacitet till skillnad från den teoretiska kurvan.

## 11.7 Tryckkalibrering

När tryckförlusterna i en hydraulisk modell är mindre än de uppmätta beror det antingen på att friktionsförlusterna i modellens ledningar är för små eller att det finns punktförluster i ledningsnätet som inte beskrivs i modellen. Om orsaken till punktförlusten inte kan slås fast eller av någon anledning inte kan åtgärdas ska den läggas in i modellen. En



punktförlust beskrivs lämpligen av en ventil med stora tryckförluster. Punktförluster uppstår ofta i anslutning till reservoarer på grund av dimensionsförändringar, avstängningsventiler och backventiler i anslutning till in- och utlopp. Punktförluster kan även finnas ute på ledningsnätet men beror då oftast på trasiga eller delvis stängda ventiler som bör kontrolleras i fält och åtgärdas.

Om tryckmätningarna indikerar att förlusterna är utspridda i ledningsnätet i stället för koncentrerade till en punkt ska förlusterna i ledningsnätet läggas på ledningarna. Normalt är det järnledningarna som får en skrovlig påbyggnad på insidan. Plastledningar brukar inte påverkas i samma omfattning. Järnledningar där vattenhastigheten är låg får med tiden ofta en kraftig påbyggnad av järnutfällningar. Påbyggnaden gör båda att rörväggen blir skrovlig och att ledningens innerdiameter minskar. Vid kalibrering av tryckförlusterna bör råhetstalet först ökas för järnledningarna i systemet. Plastledningarnas råhetstal kan också justeras upp något men det är inte rimligt att plastledningarnas råhet sätts till mer än 1 mm. Järnledningarnas råhetstal kan höjas betydligt mer. Enligt P114 är det inte meningsfullt att använda k-värden större än 5 % av ledningens innerdiameter. Råhetstalet motsvarar diametern på kornen på ledningens insida. Om till exempel kornen är så stora som 10 mm i en ledning med innerdiametern 100 mm har den vattenförande arean minskat avsevärt. När påbyggnaden ökar blir den dessutom mer som ett heltäckande lager på rörväggen än separata sfäriska korn. Därför bör ledningarnas innerdiameter minskas i stället för att höja råhetstalet ytterligare. Det är dock viktigt att både justeringar av råhetstalet och diametern dokumenteras noggrant. Originaldiametern bör också noteras för varje ledningsobjekt i modellen. Det kan göras i något attribut som inte används för själva beräkningarna. De justeringar som gjorts ska alltid noteras i modelldokumentationen.

Kalibreringen inleds med de stora huvudledningarna mellan vattenverk eller tryckstegringar och reservoarer. När den grundläggande kalibreringen av distributionssystemet är gjord sker fortsatt kalibrering av de mindre huvudledningarna samt distributionsledningarna för varje tryckzon. Det är rimligt att ansätta kalibrerade råheter för distributionsledningar även där tryckmätningar saknas under förutsättning att de kalibrerade sträckorna är representativa för systemet i stort.

Vid kalibrering bör data från tryckmätningar räknas om från tryck till trycknivå genom att addera den inmätta plushöjden vid mätplatsen. Då går det att få en uppfattning om hur trycknivån varierar mellan olika platser i systemet och därmed hur friktionsförlusterna fördelar sig i systemet.



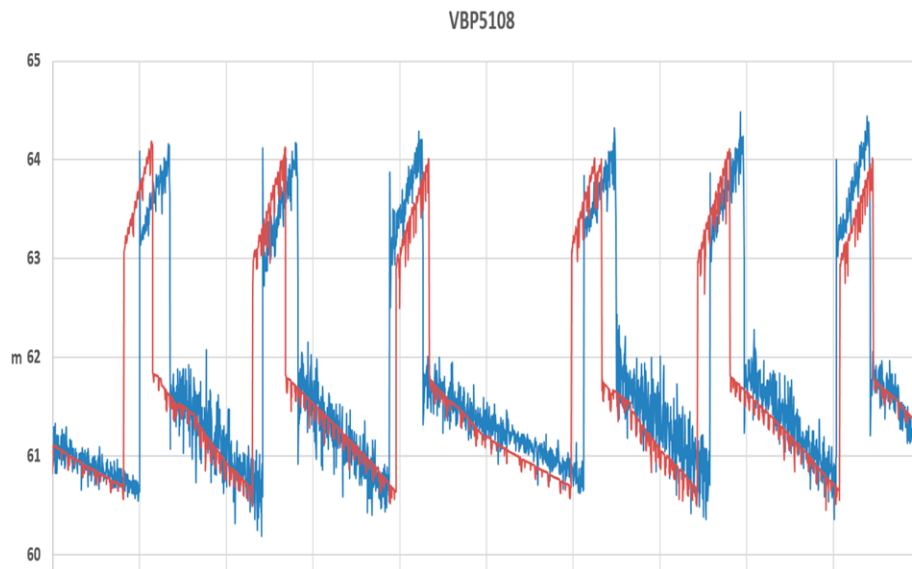
**Figur 11.20**

Exempel på påbyggnad på insidan av vattenledningar.

Om justering av råhetstalen inte är tillräckligt för att få överensstämmelse mellan mätdata och modellen behöver punktförluster utredas genom tappningsprov, se avsnitt 11.2.5.

### 11.7.1 Tryckkalibrering med tidsserie

Tryckkalibrering kan göras genom att jämföra tidsserier från mätningar och modellkörningar. I Excel eller annat kalkylprogram läggs data från periodens mätningar in och grafer skapas. Resultat från modellkörningar kopieras därefter in och redovisas tillsammans med mätdata. Därigenom är det enkelt att se vilka avvikelser som finns i modellen i förhållande till mätningarna. Vid jämförelse mellan verkliga uppmätta värden och modellresultat är det viktigaste att amplitud och utseende på kurvorna liknar varandra. Förskjutning i tid spelar mindre roll eftersom det är svårt att få förbrukningsvariationerna att stämma exakt, se Figur 11.21.

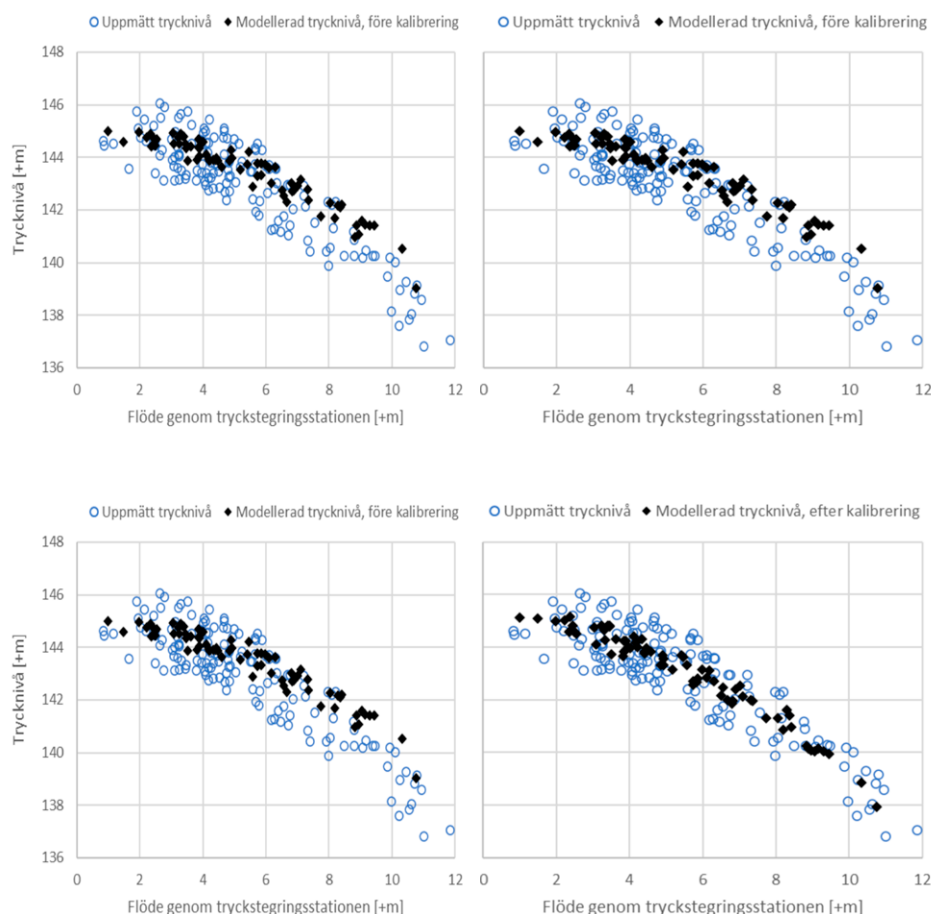


**Figur 11.21**  
Exempel på kalibrering av trycknivå.

### 11.7.2 Tryckkalibrering med sorterade värden

Mätning och modellresultat behöver inte nödvändigtvis redovisas med tid på x-axeln. Ett exempel är att redovisa uppmätt/modellerat flöde vid en tryckstegringsstation mot uppmätt/modellerad trycknivå i tryckzonen som denna försörjer. Alla tidssteg från modelleringen och alla observationer från mätning kan ritas ut i samma graf som punkter och den övergripande trenden kan då studeras. Detta exempel visas i Figur 11.22.





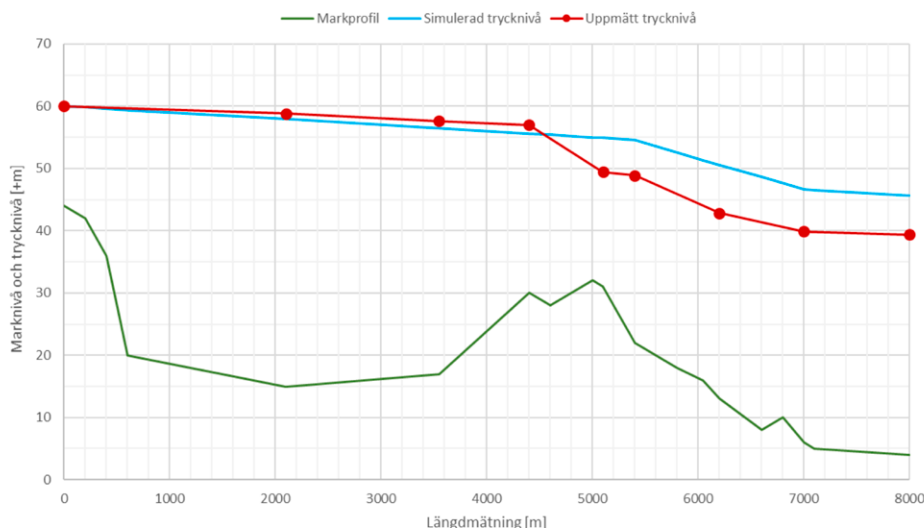
**Figur 11.22**

Kalibrering av tryckförluster genom jämförelse av tryck och flöde

Gör en översiktlig kontroll av alla tryckmätningar för att se om något värde avviker mer än förväntat. Vid behov görs justeringar av ledningarnas råhetstal och en ny kontroll görs.

### 11.7.3 Tryckkalibrering med stationära förhållanden

Om det finns tillgång till uppmätta tryck vid kända större flöden, till exempel tappningsprover eller nattflöde vid fyllning av en reservoar, görs tryckkalibrering med fördel genom simulering med stationära förhållanden. Modellen belastas då med samma flöde som rådde vid mätningen och uppmätta trycknivåer jämförs med simulerade. Figur 11.23 visar en tryckprofil längs en lång ledningssträcka där nio tryckmätare har placerats ut under ett tappningsprov. Jämförelsen visar att modellen har något större generella förluster längs med sträckan än vad mätningarna visar. En stor förlust har mätts upp mellan fjärde och femte mätpunkten som inte beskrivits i modellen. Men hjälp av resultatet från tappningsprovet kan tryckförlusterna i modellen kalibreras noga för olika delsträckor.



**Figur 11.23**

Trycknivåprofil längs en överföringsledning. Resultat från beräkning med stationära förhållanden jämförs med tryckmätningar vid ett tappningsprov.

#### 11.7.4 När är tryckkalibreringen tillräckligt bra?

När trycket kalibrerats genom jämförelse mellan mätningar och modellresultat och kurvorna har samma amplitud och utseende samt att trycket inte avviker för mycket kan modellen anses vara väl kalibrerad. Skillnaden i tryck mellan mätningar och modellresultat bör inte vara mer än 0,5 mvp för viktiga huvudledningar och som mest upp till 2 mvp längre ut i ledningsnätet. Större skillnader bör undersökas och förklaras eller åtminstone kommenteras. Observera att nivåloggning i vattentorn har många felkällor, se avsnitt 11.2.3.

Om avvikelserna mellan mätningar och modellresultat är så stora att det tyder på onormala förluster i ledningsnätet ska en plan över lämpliga fältundersökningar tas fram innan kalibreringen kan slutföras. Det rör sig ofta inledningsvis om kontroll av ventiler längs en sträcka för att undersöka om någon är helt eller delvis stängd.

Ibland händer det att modellen inte kan kalibreras till önskat resultat med en rimlig insats. Oftast är det då delar av modellen, enskilda tryckzoner, som inte är korrekta vilket gör att den trots det är användbar med vetskap om de brister som finns. Det är viktigt att osäkerheten tydligt beskrivs i modelldokumentationen.

### 11.8 Känslighetsanalys

Känslighetsanalyser kan delas in i två kategorier. Om det råder osäkerhet kring korrektheten för någon del av underlaget till modellen kan en känslighetsanalys göras för att undersöka om den aktuella parametern har så stor påverkan på resultatet att bättre underlag måste tas fram eller om osäkerheten kan accepteras. Värdet på parametern justeras upp och/eller ner inom rimliga gränser. Effekten på beräkningsresultaten studeras för att undersöka om just den aktuella parametern är av avgörande betydelse för resultatet. Det vill säga om ett litet fel i underlag eller ett antagande får stora eller försumbara konsekvenser. Det kan till exempel röra sig om dimension eller råhet för en viss ledningssträcka eller reservoarnivåer som styr en pump. Det kan också vara lämpligt att kontrollera effekten av kapaciteten för pumpar där den verkliga kapaciteten inte har kunnat kontrolleras. Det är dock ofrånkomligt att det blir en subjektiv bedömning av om effekten är stor eller liten. Den typen av analyser görs oftast i samband med kalibreringen av modellen.

En annan kategori av känslighetsanalys är att undersöka om modellens styrningar är beskrivna så att de kan hantera förändrade eller extrema flödessituationer. När en modell är kalibrerad, eller när en gammal modell tas upp för att användas, bör den belastas

---

med ett ökat flöde med ett annat förbrukningsmönster för att säkerställa att modellen är allmängiltig. Om systemet till exempel matas med ett flöde definierat av en tidsserie kommer nivåerna i reservoarerna bli konstiga vid ett förändrat förbrukningsmönster. Det samma kan gälla om styrningen av systemets matning är så avancerad i verkligheten att det var nödvändigt att beskriva den förenklat i modellen.

## 12 Simuleringar med färdig modell

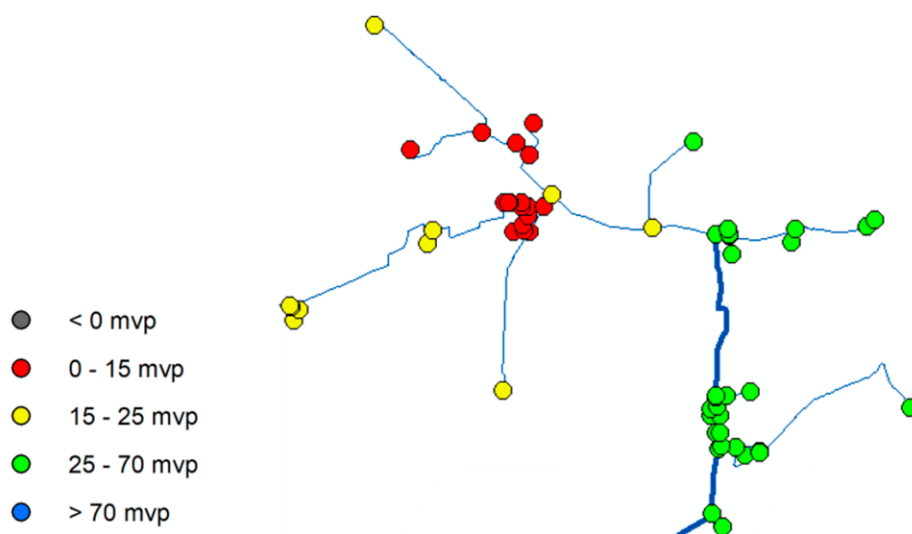
Den färdiga modellen används för att simulera hur ett system uppför sig under olika förhållanden. Modellen är ett bra verktyg för att undersöka effekter av olika förändringar i systemet. Det kan vara ändrade flöden eller ombyggnad av själva systemet. Oftast jämförs resultatfilerna från simuleringar före och efter förändringen. Det kan också vara intressant att studera resultaten av simulering med nulägesmodellen för att identifiera förbättringsmöjligheter.

Simulering med den hydrauliska modellen kan antingen göras i ett tidssteg med stationära förhållanden eller som en simulering med en utökad period med beräkningar i många tidssteg. Utökad simuleringsperiod används för att till exempel simulera nivåvariation i högreservoarer, och behovet av magasinvolym för att utjämna tillfälliga toppar i förbrukningen. Om förhållandena vid ett specifikt dimensionerande tillfälle ska studeras kan det räcka att göra en simulering med stationära förhållanden. Simulering med stationära förhållanden kan dock bli missvisande om till exempel ett brandvattenuttag ska testas för ett system som inte har kapacitet att leverera höga flöden under en längre tid. Så är fallet med en zon där trycket hålls jämnt av en hydrofor, men där de matande pumparna har låg kapacitet.

### 12.1 Nuläge

Nulägesmodellen ska beskriva systemet och dess funktioner så likt verkliga förhållanden som möjligt. Resultatfilerna kan användas för att identifiera förhållanden i systemet som inte är önskvärda. Det kan till exempel vara:

- Låga eller olämpligt höga tryck i delar av systemet
- Partier där trycket faller kraftigt under vissa förhållanden
- Ledningssträckor med konstant låga hastigheter
- Ledningssträckor med höga hastigheter
- Delar av systemet, ledningar eller tryckstegringsstationer, som inte kan leverera erforderligt flöde med godtagbart tryck



**Figur 12.1**

Planplott över tryckfördelning i ett nät

Nulägesmodellen kan också användas för att studera hur en eventuell förorening skulle sprida sig i systemet och hur insatser med spolning och desinfektion bör göras för att få bäst effekt. Som nämnts i avsnitt 3.5 görs en spridningssimulering genom att det vatten som matas in i systemet ges en digital märkning för respektive inmatningspunkt och spridningen av vatten med olika märkning kan sedan studeras. På samma sätt kan spridningen av olika vatten i ledningsnätet illustreras samtidigt som det går att se hur många timmar det tar innan hela ledningsnätet har fyllts på med ”nytt” vatten.

En nulägesmodell kan även användas till att göra en beräkning av medelvattenåldern i olika delar av systemet. Eftersom det inte är självklart att vatten som varit i systemet länge blir dåligt är det inte ett tydligt mått på vattenkvaliteten i systemet. Däremot kan ålder tjäna som en indikator på var och vid vilken tidpunkt det kan vara aktuellt att ta vattenprover för att undersöka vattnet när risken för dålig kvalitet är som störst.

Nulägesmodellens resultat används också som jämförelse när effekten av olika åtgärder simuleras.

Beroende på vilka resultat som ska illustreras bör de redovisas på olika sätt. I kapitel 6 visas exempel på redovisning av olika resultat och i Tabell 12.1 ges rekommendationer för hur olika resultat bör redovisas.

| Typ av resultat / simulering                        | Typ av redovisning                                                                                                                                                                                                                                               | Gränsvärden / Skala                                               |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Höga tryck                                          | Tryckplot i plan med högsta trycket under simuleringen redovisat som färgade ledningar och/eller noder.<br>Simulera flera dygn inklusive ett dygn med mindygnsfaktor.                                                                                            | <50 mvp<br>50-60 mvp<br>60-70 mvp<br>70-100 mvp<br>>100 mvp       |
| Låga tryck                                          | Tryckplot i plan med lägsta trycket under simuleringen redovisat som färgade ledningar och/eller noder.<br>Simulera flera dygn inklusive ett dygn med maxdygnsfaktor.                                                                                            | <0 mvp<br>0-15 mvp<br>15-25 mvp<br>25-70 mvp<br>>70 mvp           |
| Höga och låga hastigheter                           | Hastighetsplot i plan med högsta hastighet under simuleringen redovisat som färgade ledningar.<br>Simulera flera dygn inklusive ett dygn med maxdygnsfaktor.                                                                                                     | <0,2 m/s<br>0,2-0,6 m/s<br>0,6-1,0 m/s<br>1,0-1,5 m/s<br>>1,5 m/s |
| Tryckförluster på vissa sträckor                    | Plotta trycknivåerna vid en tidpunkt med högt flöde i en profil längs med stråket.<br>Simulera en tidpunkt med känt, stort flöde i slutet av ledningen.<br>Förbrukningen utmed sträckan ska vara försumbart i jämförelse med det stora uttaget i nedströmsänden. |                                                                   |
| Spridnings-simuleringar och vattenålder i ledningar | Plotta spridningen vid olika tidpunkter på planbilder, eller spara resultatplotningen som en film där förändringen syns i planploten.                                                                                                                            |                                                                   |
| Vattenålder i reservoar                             | Plotta som en graf där vattnets medelålder vid olika tidpunkter redovisas                                                                                                                                                                                        |                                                                   |

## 12.2 Scenarier

För att undersöka effekten av framtida förväntade förändringar i förbrukning eller på systemets uppbyggnad görs simuleringar av olika scenarier. Det kan till exempel handla om förtätningar eller utbyggnad av nya områden, men det kan även handla om effekter av minskad befolkning eller avveckling eller omvandling av en stadsdel. Resultaten jämförs ofta med resultat från nulägesmodellen. De mest intressanta resultaten är trycksituationen och kontroll av om det finns några trånga sektioner i systemet samt vad som krävs för att kunna försörja abonnenterna med tillräckligt tryck vid maxtimmen under maxdygnet. Se diskussion om förbrukningsmönster och dygnsfaktorer i avsnitt 12.3.

**Tabell 12.1**

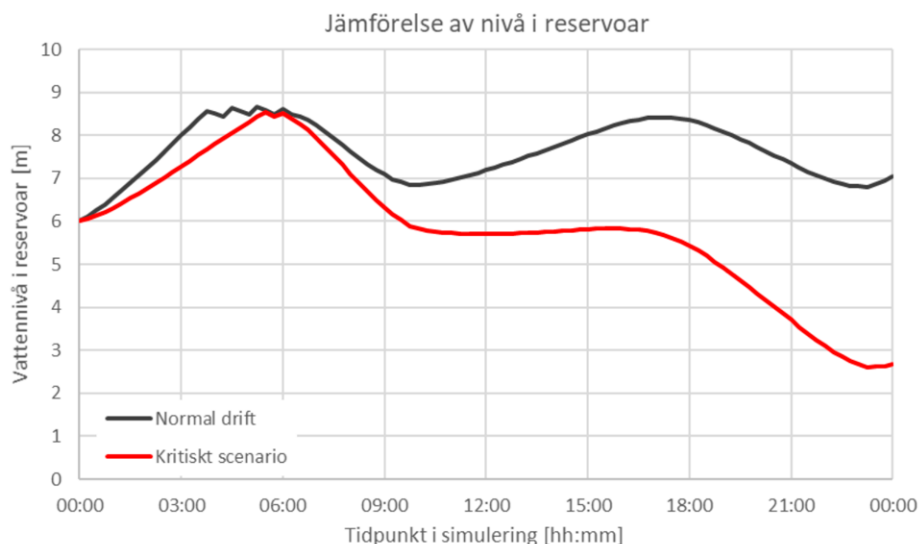
Rekommendationer för redovisning av olika typer av resultat

Vid simulering är det viktigt att tydligt hålla isär nulägesmodellen och olika scenariomodeller. Var noga med namngivning och ange i modelldokumentationen vad scenariomodellerna heter och skriv några ord om vad scenariot innebär, se avsnitt 13.1.

När effekten av planerade förtätningar och utbyggnader inom distributionssystemet ska simuleras bör den framtida flödesökningen läggas in i modellen som tillkommande förbrukningspunkter. För att undersöka hur systemet uppför sig vid mindygn och maxdygn bör skalade förbrukningsmönster användas.

När ett scenario med ändrad förbrukning testas kan det vara lämpligt att kontrollera att systemets styrningar, som troligen har anpassats för nuläget, inte begränsar kapaciteten i systemet. Det kan till exempel vara fallet när ett pumpflöde styrs för att hålla kontrollera effekten av att flödet blir 10 % större än vad prognosen säger. På motsvarande sätt måste randvillkoren kontrolleras så att de är representativa vid ändrad förbrukning.

En annan variant på scenarier är leveranssäkerhet och krisscenarier där systemets kapacitet vid till exempel ledningsbrott i kritiska lägen eller bortkopplad reservoar eller tryckstegring undersöks. Det som är intressantast att redovisa i dessa fall är lägsta tryck under simuleringen. Det redovisas lämpligen i planplottar. Vid ledningsbrott är det även intressant att kontrollera möjligheten att hålla uppe nivån i reservoarer som normalt matas av ledningen. Det redovisas lämpligen som en graf över vattennivån i reservoaren, se exempel i Figur 12.2.



**Figur 12.2**

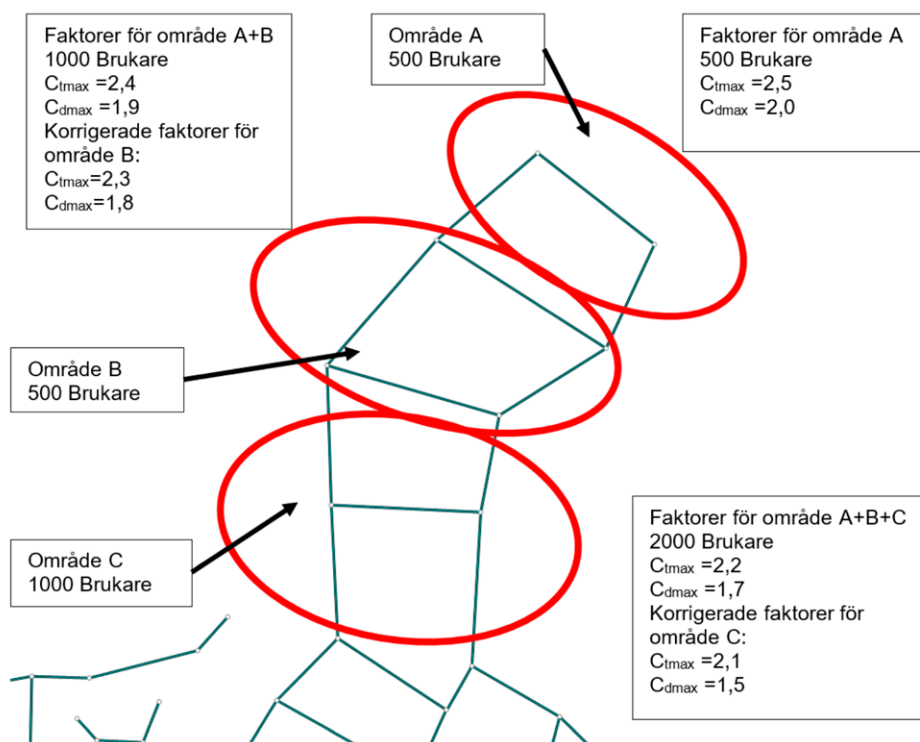
Graf över nivåer i högreservoar vid normal drift samt vid ett kritiskt scenario (till exempel ledningsbrott)

När ett scenario med ändrad förbrukning testas kan det vara lämpligt att kontrollera att systemets styrningar, som troligen har anpassats för nuläget, inte begränsningar kapaciteten i systemet. Det kan till exempel vara fallet när ett pumpflöde styrs för att hålla en viss börvärdeskurva i en reservoar och börvärdena är optimerade för nuläget.

## 12.3 Dimensionering med hjälp av hydraulisk modell

En hydraulisk modell är ett bra verktyg vid dimensionering av överföringsledningar, större huvudledningar och cirkulationsnät där det finns parallella vägar för vattnet och är svårt att förutsäga hur flödet kommer att fördela sig. Det är dock viktigt att använda rätt faktorer för maxtimme och maxdygn. I P114 står det "Om syftet är att utreda påverkan på hela distributionsområdet (till exempel en hel stad) och primärt det försörjande huvudledningsnätet så blir det viktigt att medel/max dygns- och timfaktorer sammanlagras för att gälla hela det studerade området." Det får tolkas som att området längst ut i ledningsnätet ska ges förbrukningsfaktorer ansatta utifrån antal brukare i det området

medan faktorer för områden närmre huvudledningen ska ges anpassade faktorer så att den sammanvägda faktorn för aktuellt område och områdena längre ut i systemet hela tiden stämmer med faktorerna för den totala folkmängden. Se Figur 12.3 nedan. Förbrukningsfaktorer bestäms enligt P114.



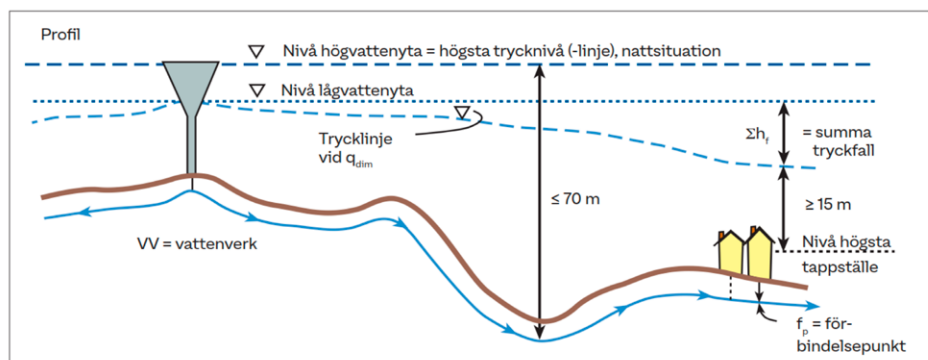
**Figur 12.3**

Princip för anpassning av förbrukningsfaktorer vid dimensionering av vattenledningar med hjälp av hydraulisk modellering

Hydraulisk modellering är inte alltid det optimala verktyget vid dimensionering. Det kan till exempel vara när båda dimensioneringsmetoderna enligt P114, fler eller färre än 500 brukare, ska tillämpas för olika delar av det ledningsnät som ska dimensioneras. Då går det oftast snabbare att utföra manuella beräkningar. Den hydrauliska modellen kan dock med fördel användas för att beräkna trycknivån i de punkter där de nya ledningarna ska ansluta till det befintliga systemet.

När hydraulisk modellering används för dimensionering av vattenledningar räcker det att göra simuleringar för det tidssteg som sammanfaller med maxtimfaktorn. Resultaten som ska analyseras är tryck och vattenhastighet. De redovisas lämpligen plottade som planbilder. För att kontrollera erforderligt flöde för att fylla en reservoar krävs däremot en utökad simulering.

Observera att kraven på tryck som ställs i P114 ska uppfyllas och att systemet ska klara alla de belastningsfall som beskrivs i kapitel 3 i P114. Kraven på tryck vid normal drift illustreras i Figur 12.4 nedan. I P114 avsnitt 3.5 beskrivs hur dimensionerande flöde beräknas för olika scenarier som till exempel brandvattenuttag och rörbrott.



**Figur 12.4**

Princip för beräkning av tryck i distributionsnät (Från Vårt Vatten)

I P114 anges det att vattenhastigheten bör uppnå värdet 0,2 m/s någon gång varje dygn, även vid låg förbrukning. Det innebär att hastigheten vid mindygnets maxtimme ska undersökas för att minska risken för dålig omsättning i systemet.

## 12.4 Brandvatten

Kontroll av brandvattenkapaciteten kan göras på några olika sätt antingen med modellprogrammets brandvattenfunktioner eller genom anpassning av den enskilda modellen. Syftet med kontrollen och vilken noggrannhet som eftersträvas avgör vilken metod som bör väljas.

När kontroll av många brandposter behöver göras för att ge underlag till planering av brandvattenförsörjningen i ett större geografiskt område, underlättas arbetet om en programmodul för brandvattenanalys används. Beräkning av tillgängligt flöde vid ett bestämt tryck eller omvänt, beräkning av tillgängligt tryck vid ett bestämt flöde, kan då göras för ett stort antal noder i samma modellsimulering. Det är även möjligt att analysera påverkan på den normala vattenförsörjningen samtidigt som brandvattenuttaget görs. Resultatet kan visas grafiskt direkt i modellprogrammet eller exporteras för att visas i kartbaserade tjänster. Sortering görs enkelt för att identifiera brandposter som har för dålig kapacitet, de som uppfyller kraven för normalt brandvattenflöde enligt kraven i P114 samt de som har hög kapacitet (så kallade superbrandposter).

Vid noggrannare kontroll av en enskild brandpost bör en Q/H-kurva plottas som illustrerar förhållandet mellan tryck och flöde från stängd till helt öppen brandpost. Detta ger svar för ett enskilt uttag men säger ingenting om hur trycket påverkas i omgivande ledningsnät.

För att modellen ska kunna ge svar på systemets uthållighet, det vill säga hur länge brandvattenförsörjningen kan upprätthållas, måste simuleringen göras för en längre tidsperiod. Brandposten definieras då som en normal förbrukare med eller utan ett anpassat förbrukningsmönster för brandvatten.

Vid all kontroll av brandvattenkapaciteter är modellens inställda randvillkor under simuleringen viktiga för resultatet. Faktorer som kan påverka kapaciteten är tidpunkt på dygnet med hänsyn till förbrukningsmönster och belastning i modellen, nivåer i reservoarer samt sannolikheten att tryckstegringar är i drift under normala och extrema situationer.

I P114 rekommenderas att vattennätet dimensioneras för att klara brandvattenförsörjning vid normalflöde, det vill säga maxtimflöde under medeldygnets. Det beror på att sannolikheten är liten att behovet av brandvatten uppstår vid dimensionerande flöde, det vill säga maxtimflöde under maxdygnet. Det kan dock vara intressant att i modellen även studera vilket brandvattenflöde som är tillgängligt vid dimensionerande flöde.

Simuleringar av brandvattenuttag är teoretiska och innehåller stora osäkerheter eftersom små avvikelser i ledningarnas råhetstal ger stor påverkan på friktionsförlusterna.



---

## 12.5 LTA-system

Det som är intressant att studera i en hydraulisk modell över ett LTA-system är framför allt att alla pumpar har möjlighet att pumpa fram sitt flöde. Om systemet innehåller många pumpar och några pumpar är placerade på en lägre plushöjd än de övriga kan det inträffa att somliga pumpar aldrig får tillfälle att leverera sitt flöde om ledningskapaciteten är lite snålt tilltagen. Det gäller i första hand system med cirkulationspumpar. Om uppfordringshöjden är stor kan somliga pumpar även få väldigt långa gångtider. Genom att plotta tryck i plan kan de stationer som har högt mottryck lokaliseras och studeras närmare vad gäller nivå i pumpsump och flöde och gångtider som grafer.

Det är också intressant att studera vattnets uppehållstid i systemet. Det görs genom att högsta medelvattenålder plottas i plan. Lång uppehållstid indikerar risk för bildning av svavelväte.

För att säkerställa självrensning i systemet bör vattenhastigheten, enligt P110, överstiga 0,6 m/s minst en gång per dygn. Om det inte är fallet bör beräkningar av självrensningsförmågan göras.

## 12.6 Online-modellering

När en hydraulisk modell matas och drivs med aktuella data och information från styr- och övervakningssystem och andra driftsystem kallas det för online-modellering och kan användas till flera typer av beräkningar. Mycket av det som brukar framhållas som möjligheter med en online-modell kan dock göras lika bra genom simuleringar i en vanlig modell eller studeras direkt i styr- och övervakningssystemet. En välkalibrerad online-modell kan visserligen bidra med information om tryck i känsliga punkter där tryckmätare saknas. Men om det är viktigt att övervaka trycket i en viss punkt bör det mätas och loggas i styr- och övervakningssystemet.

En tydlig möjlighet med online-modeller är dock att det underlättar offline-modellering eftersom modellerna med automatik ställs in och kan användas för att simulera med verklig data som ingångsvärden.

Vid läcksökning kan en online-modell vara till hjälp för att lokalisera läckan på ett ungefär. Då måste modellresultaten på ett intelligent sätt samverka med information från tryck- och flödesmätare. Det förutsätter dessutom, som alltid, att modellen verkligen återspeglar förhållandena i det fysiska systemet. Om en eller ett par ventiler är stängda i verkligheten men öppna i modellen kommer modellanalysen bli felaktig och det kan påverka lokaliseringen av läckan.

En fördel med att ha en online-modell är att den används och därför inte glöms bort utan alltid hålls uppdaterad och aktuell. Avstämningen mot kontinuerlig mätning gör också att kalibreringen ständigt kontrolleras.

Online-modellering kan ses som ett första steg mot modeller som använder artificiell intelligens (AI). Inom en nära framtid kommer vi troligen se hydrauliska modeller som ständigt matas med data om tryck och flöde i punkter på ledningsnätet och i vattenmätare hos abonnenterna. En sådan modell kommer både kunna larma om ovanliga förändringar i systemet och testa sig fram till en trolig orsak till förändringen. En AI-modell skulle även kunna optimera driften av systemet genom att AI:n kan se mönster med korta och långa återkomsttider. Om modellen tillåts styra driften av systemet skulle den även kunna optimera omsättning, tillgången på extravolym när förbrukningen kan förväntas bli stor samt energiåtgång genom styrning av pumpar. Simuleringar kan också visa om systemets kapacitet kommer räcka till eller om det bör utfärdas bevattningsförbud eller andra restriktioner. Modellen skulle också kunna optimera trycket i en zon så att det håller tillräckligt högt tryck under alla timmar på dygnet samtidigt som det aldrig är onödigt högt. Det skulle kunna minska utläckaget.

---

# 13 Dokumentation och kvalitetssäkring

## 13.1 Dokumentation

Till varje modell bör en grundlig dokumentation genomföras som följer modellen så att alla som kommer i kontakt med modellen och dess resultatfiler kan skapa sig en bild av modellens bakgrund och noggrannhet. Dokumentationen ska upprättas allt eftersom arbetet med uppbyggnad och kalibrering fortskrider för att säkerställa att viktiga vägval och antaganden blir dokumenterade. Många viktiga detaljer kommer att glömmas bort om de inte förs in i dokumentationen när de är aktuella.

Av modelldokumentationen ska det framgå:

- vem som har skapat modellen (person/-er och företag/myndighet)
- på vems uppdrag modellen har skapats (person och företag/myndighet)
- när modellen skapades, med vilket program och version
- vilket som var/är huvudsyftet med att bygga modellen
- vilket underlag som använts och kvaliteten på det
- vad modellen är avsedd att användas till
- hur systemet fungerar (systembild, typ flödessystemschemata)
- hur modellen är kalibrerad och efter vilka mätningar (bifoga mät rapporter)
- om det finns delar av modellen som är skapade med lägre upplösning än andra
- om det finns kända osäkerheter i underlaget eller modellen
- vilka känslighetsanalyser som har gjorts och på vilka parametrar

Det är mycket viktigt att samtliga antaganden som gjorts under modellarbetet tydligt framgår. Dokumentationen bör vara så utförlig att om någon annan gör om samma arbete ska de komma till samma resultat. I Bilaga E finns förslag på en rapportstruktur för en modelldokumentation.

Dokumentationen ska göras klar och överskådlig. Det är inte lämpligt att göra den i dagboksform där alla ändringar läggs in i kronologisk ordning. Beskrivningen ska i stället göras i rubrikform så att all information om ett ämne står att läsa på samma ställe.

Det är lämpligt att göra skärmdumpar av tabeller och kartbilder och sätta in som illustrationer i dokumentationen.

Om modellen senare justeras, utökas eller kalibreras, ska dokumentationen uppdateras och det ska framgå vilka förändringar som gjorts.

Om modellen sparas i olika versioner, till exempel olika scenarier, ska det dokumenteras och det ska tydligt framgå vilken version som är den kalibrerade grundmodellen. Det görs lämpligen i en tabell som kan redovisas i en bilaga till dokumentationen. Av tabellen ska det framgå:

- Filnamn på modellen / scenariot
- Vem som skapat modellversionen
- Företag / organisation
- Datum
- Kort men tydlig beskrivning av vad som skiljer de olika scenarierna från varandra och från grundmodellen.

---

Checklista för uppbyggnad av modellen finns i Bilaga B.

Känslighetsanalyser kan dokumenteras med planbilder eller profiler som visar exempelvis effekter av olika vattenuttag.

I de modellprogram där det går att föra anteckningar i modellen för olika objekt bör det göras som ett komplement till modelldokumentation. I förvaltningsskedet är det fördelaktigt att kunna läsa den viktigaste informationen, till exempel kalibreringspunkter och osäkerheter, direkt i modellen. Det är dock viktigt att informationen uppdateras på båda ställena när en uppdatering eller justering görs.

Om några värden är okända och antaganden behöver göras är det lämpligt att lägga in ett värde som avviker från de normala värdena men som ändå är rimligt. De värden som används ska noteras i dokumentationen så att de lätt kan sökas ut i modellen.

## 13.2 Namngivning av modeller

För att underlätta arbetet när en befintlig modell ska användas bör alla modeller ges tydliga och strukturerade namn. Namnet bör innehålla information om objektets namn, datum då modellen senast justerades samt initialer för den som senast arbetade med modellen, till exempel "Åkershöga\_20210414\_NN.INP".

När scenariokörningar namnges bör samma grundstruktur användas. För att undvika att scenarier i olika projekt förväxlas bör namnet innehålla grundmodellens namn med ett tillägg som talar om vilket scenariot är. I modelldokumentationens bilaga ska alla scenarier beskrivas mer utförligt i tabellform se avsnitt 13.1.

## 13.3 Kvalitetssäkring

Det är viktigt att arbetet med modellering kvalitetssäkras. Det görs bäst genom att en erfaren modellör (annan än den som byggt upp modellen) granskar modellen tillsammans med underlaget. Samtliga förenklingar och antaganden bör diskuteras. Verifieringen bör också granskas av en erfaren modellör.

Det är inte rimligt att i detalj granska varje parameter i en stor modell, men genom att göra överslagsberäkningar av till exempel förluster i ledningsstråk och strategiskt välja ut objekt för granskning kan viktiga fel hittas. Det är nästan ofrånkomligt att mindre fel finns i stora modeller. Det kan till exempel vara fråga om att felaktigt material, och därmed råhet, valts på en ledning. Om det är fråga om ett fåtal fel av denna typ kan deras inverkan på beräkningsresultaten antas ligga inom felmarginalen för hur noggrant det går att beskriva ett ledningsnät i en modell. De kan därför anses ha försumbar betydelse. Kvalitetssäkringen bör därför inriktas på fel som har avgörande betydelse för beräkningsresultaten. Tabellen nedan ger förslag på hur kvalitetssäkringen kan gå till. Information om kvalitetssäkring bör föras in i modelldokumentationen.

| Vad                                             | Hur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Kommentar                                                                                      |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vattenförbrukning                               | Summera förbrukningen i modellen (inte utläckage). Räkna om till l/dygn. Antag specifik förbrukning, till exempel 200 l/p&d <sup>1</sup> . Dividera beräknad volym med specifik förbrukning. Är det antal brukare som då erhålls rimligt i förhållande till områdets storlek?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Industrier, handelsområden med mera måste också beaktas                                        |
| Felaktiga dimensioner, enhetsfel                | Kontrollera att ledningarna förts in i modellen med rätt enhet. Det normala är att diametern anges i mm både i modellprogrammet och i ledningsdatabasen, men undantag kan finnas. Eftersom det i vattenledningsnät är mycket ovanligt med ledningsdiametrar som är större än 1 meter eller mindre än 10 mm är en lämplig metod att söka ut alla ledningar med en diameter utanför det intervallet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                |
| Felaktigt införda små dimensioner               | Gör en simulering för några dygn. Rita ut resultatet som trycknivå. Där det sker stora tryckfall beror det ofta på att någon ledning fått en felaktigt liten dimension.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Det behöver inte alltid vara fel, men just dessa områden i modellen bör granskas mer i detalj. |
| Felaktiga dimensioner på ledningar i underlaget | Ett vanligt "fel" i underlaget är att ledningar är angivna med ytterdiameter medan modellerna kräver innerdiameter för att räkna rätt. Vanligtvis är det plastledningar varför felsökning efter detta fel kan begränsas till dessa. Om ledningsmaterialet saknas för många ledningar går det dock inte att göra urvalet på material. Då kan i stället vanligt förekommande dimensioner undersökas. Till exempel kan dimensionerna 63, 90, 110, 160, 280, 315, 355, 560, och 630 mm antas ange ytterdimension på plastledningar. För andra dimensioner, till exempel 200, 250, 400 och 500 mm är det svårare att bara utifrån dimensionen slå fast att det är ytterdiameter. Ledningens ålder och material på andra ledningar i området kan ge ledtrådar. |                                                                                                |
| Tidssteg vid beräkningarna                      | Om det hydrauliska tidssteget valts för långt kommer det innebära att pumpar startar och stannar för sent och att nivåer i reservoarer och hydroforer sjunker lägre och stiger högre i modellen än det gör i verkligheten. Plotta nivån i hydroforer och reservoarer för att kontrollera om toppar och dalar ser rimliga ut                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Kontrollera att valt beräkningstidssteg ger stabila beräkningar                                |
| Motstridiga styrningar                          | Kontrollera att villkoren i modellens styrningar inte är motstridiga. Det kan göra att beräkningen tar lång tid och att resultatet blir felaktigt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                |

1 I P114 anges 195 l/p&d som medelvärde för specifik debiterad vattenförbrukning under 2018 för områden med en blandning av bostäder och olika verksamheter i 181 kommuner i Sverige.

#### Tabell 13.1

Förslag på tillvägagångssätt för kvalitetssäkring av vattenmodeller.

## 13.4 Konvertering mellan programvaror och versioner

Olika programvaror beskriver delar av modellen på olika sätt. Det kan till exempel vara vattenförbrukning eller pumpkapacitet och styrningar. Det är därför mycket viktigt att gå igenom och granska modellen efter en konvertering från ett program till en annan. Det har historiskt även gällt olika versioner av samma program. Helst ska resultaten från en simulering gjord i den gamla versionen jämföras med resultaten från den konverterade modellen. Om reservoarnivåer samt tryck och flöden före och efter tryckstegringar och tryckregleringar endast skiljer sig marginellt åt kan den konverterade modellen anses ha samma kvalitet som den ursprungliga. Eftersom antalet iterationer och skillnader i känslighetsgränser kan variera mellan olika programvaror och olika versioner är det sannolikt att resultaten från två beräkningar kan skilja något.

## 13.5 Uppdatering och kontinuerligt underhåll av modeller

Den kalibrerade modellen beskriver nuläget. Eftersom alla system förändras över tid blir det som är aktuellt idag snart inaktuellt. Kontinuerlig uppdatering av modeller är därför att rekommendera.

---

Det är alltid viktigt att förändringar i systemet dokumenteras. Eftersom det inte alltid sker är det viktigt att ha ett inledande möte med personal som ansvarar för den dagliga driften av systemet när en modell ska uppdateras. Det är inte ovanligt att driftpersonalen känner till ledningsomläggningar eller pumpbyten som inte har dokumenterats.

För att modellen ska vara relevant när den behövs måste den vara uppdaterad. Modelluppdateringar bör göras med jämna mellanrum, se även kapitel 2.5.

För att tydliggöra vilka objekt och vilka attribut som varit med i modellen från uppbyggnaden och vilka som uppdaterats och när, bör importerad data märkas så att tidpunkt för olika uppdateringar framgår.

### **13.5.1 Förbrukningar**

Om förbrukningarna är inlagda i modellen som förbrukningspunkter med ett unikt namn som går att matcha mot debiteringsregistret kan förbrukningen lätt uppdateras. Var dock uppmärksam på om förbrukningen har räknats upp eller ner för att få flödesbalansen att stämma vid en tidigare kalibrering. Flödesbalansen bör göras om när förbrukningarna uppdateras. Det bör göras med jämna mellanrum för att bland annat säkerställa att utläcket är korrekt beskrivet, se kapitel 2.5.

### **13.5.2 Ledningsnätet**

När en modell ska uppdateras bör först ledningsdatabasen uppdateras. Om databasen är uppdaterad och alla nylagda och omlagda ledningar är daterade räcker det att ta ut alla ledningar med ett datum senare än modellens senaste uppdatering. Därefter görs en GIS-analys för att se vilka ledningar som ska uppdateras och vilka som ska raderas och ersättas. Arbetet med att uppdatera den hydrauliska modellen underlättas om objekten får behålla sina namn i databasen när den uppdateras. Om databasen gjorts om så att många objekt fått nya namn måste matchningar göras på läge med hjälp av GIS-program.

Om det inte går att slå fast vilka förändringar som gjorts sedan modellens senaste uppdatering bör en GIS-analys göras för att söka ut alla ledningar som skiljer sig mellan databasen och modellen. För en erfaren GIS-handläggare är det troligen enklare att göra uppdateringen av ledningsnätet i ett GIS-program och sedan återimportera ledningsnätet till modelleringsprogrammet.

Kontrollera alltid att innerdiameter angivits korrekt för den data som ska importeras till modellen.

### **13.5.3 Anläggningar**

Om nya anläggningar har byggts i modellområdet läggs dessa in på samma sätt som när en modell byggs upp.

Om anläggningar byggts om eller pumpar bytts ut läggs korrekt kapacitetsdata eller pumpkurvor in i modellen.

### **13.5.4 Styrning**

Kontrollera med driftpersonalen om det har gjorts några förändringar i hur reservoarer, tryckstegringar och tryckregleringar styrs sen modellen uppdaterades senast. Det pågår oftast ett ständigt förbättringsarbete vad gäller driften av distributionssystemet.

---

# Referenser

- Häggström, S. (2009). Hydraulik för samhällsbyggnad. Liber. ISBN: 9789147093441.
- Johannesson & Vretblad (2011). Byggformler och tabeller, 11:e upplagan. Liber. ISBN: 9789147100224.
- Malm A., Horstmark A., Jansson E., Larsson G., Meyer A. och Uusijärvi J. (2011). Handbok i förnyelseplanering av VA-ledningar. SVU-rapport 2011-12. Stockholm: Svenskt Vatten
- Malm A., Axell L., Svensson G. och Røstum J. (2019) Vattenförluster från ledningsnätet. SVU-rapport 2019-17. Stockholm: Svenskt Vatten
- Hammarlund H., Törneke K. och Siegwan L (2020) Dimensioneringstal för vattenförbrukning. SVU-rapport 2020-7. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Granlund B. och Nilsson D. (2000) Mätningar i avloppsnät samt principer för verifiering av avloppsmodeller. VA-Forsk Rapport 2000-07. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Svenskt Vatten (1988). Tryckslag i VA-anläggningar. VAV Publikation P58.
- Svenskt Vatten (2001). Allmänna Vattenledningsnät. VAV Publikation P83.
- Svenskt Vatten (2016). Avledning av dag-, drän- och spillvatten. Publikation P110.
- Svenskt Vatten (2020). Distribution av dricksvatten. Publikation P114.

# Bilaga A Indata för uppbyggnad av vattennätsmodell

Önskat format för indata listas nedan i fallande ordning.

- 1) \*.shp (GIS)
- 2) \*.xlsx (Excel)
- 3) \*.mdb (Access)
- 4) \*.dwg (CAD)
- 5) \*.pdf
- 6) Papper

Nödvändig data är markerad med normal stil.

Önskad data är kursiv.

i>

|                                                                                                                                                       | Mottaget | Behandlat | Importerat | Modellerat | Datakälla / Anmärkningar |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------|------------|--------------------------|
| <b>Noder:</b>                                                                                                                                         |          |           |            |            |                          |
| Läge                                                                                                                                                  |          |           |            |            |                          |
| Namn/ID (till exempel VPL0001)                                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                       |          |           |            |            |                          |
| <b>Ledningar:</b>                                                                                                                                     |          |           |            |            |                          |
| Ledningsdimension                                                                                                                                     |          |           |            |            |                          |
| Material                                                                                                                                              |          |           |            |            |                          |
| <i>Från nod-Till nod</i>                                                                                                                              |          |           |            |            |                          |
| <i>Ålder</i>                                                                                                                                          |          |           |            |            |                          |
| <i>Namn/ID</i>                                                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                       |          |           |            |            |                          |
| <b>Tryckstegringsstationer</b>                                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
| Styrande nod                                                                                                                                          |          |           |            |            |                          |
| Startkriterier för samtliga pumpar                                                                                                                    |          |           |            |            |                          |
| Stoppkriterier för samtliga pumpar                                                                                                                    |          |           |            |            |                          |
| Pumpkurvor eller information om tillverkare och modell och pumpshjul för samtliga pumpar alternativt maxflöde för var pump och för hela pumpstationen |          |           |            |            |                          |
| Varvtalsreglerade pumpar kräver även börnivåer och vilka intervall som pumparna jobbar inom.                                                          |          |           |            |            |                          |
| Information om styrning, till exempel om alla pumpar går samtidigt                                                                                    |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                       |          |           |            |            |                          |
| <b>Vattenförbrukning</b>                                                                                                                              |          |           |            |            |                          |
| Debiteringsregister med angiven brukarkategori                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
| Distribuerad samt debiterade totalvolym, m <sup>3</sup> /år (för ett par år tillbaka)                                                                 |          |           |            |            |                          |
| Läge eller X/Y-koordinat för förbrukaren/fastigheten                                                                                                  |          |           |            |            |                          |
| <i>Eventuell prognos för framtida förbrukning (om framtidsmodell ska tas fram)</i>                                                                    |          |           |            |            |                          |

|                                                                                                                                                                                                                            | Mottaget | Behandlat | Importerat | Modellerat | Datakälla / Anmärkningar |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------|------------|--------------------------|
| <b>Topografi</b>                                                                                                                                                                                                           |          |           |            |            |                          |
| Höjddata från laserskanning, helst i färdigt rasterformat (ESRI GRID eller motsvarande)                                                                                                                                    |          |           |            |            |                          |
| (alt. Höjdpunkter)                                                                                                                                                                                                         |          |           |            |            |                          |
| (alt. höjdkurvor med kopplat höjdvärde, om ovanstående inte finns)                                                                                                                                                         |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                                                                                            |          |           |            |            |                          |
| <b>Kartor</b>                                                                                                                                                                                                              |          |           |            |            |                          |
| Baskarta                                                                                                                                                                                                                   |          |           |            |            |                          |
| Hus                                                                                                                                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
| Vägar                                                                                                                                                                                                                      |          |           |            |            |                          |
| Ortofoto                                                                                                                                                                                                                   |          |           |            |            |                          |
| <i>Fastighetsgränser som polygoner</i>                                                                                                                                                                                     |          |           |            |            |                          |
| <i>Vattendrag</i>                                                                                                                                                                                                          |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                                                                                            |          |           |            |            |                          |
| <b>Vattenverket</b>                                                                                                                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
| Levererat flöde från vattenverket                                                                                                                                                                                          |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                                                                                            |          |           |            |            |                          |
| <b>Flöden (vid kalibrering)</b>                                                                                                                                                                                            |          |           |            |            |                          |
| Högupplöst flödesmätning under representativ period                                                                                                                                                                        |          |           |            |            |                          |
|                                                                                                                                                                                                                            |          |           |            |            |                          |
| <b>Övriga intressanta indata:</b>                                                                                                                                                                                          |          |           |            |            |                          |
| Projekteringsritningar <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan</li> <li>• Profiler</li> <li>• Tvärsektioner</li> </ul>                                                                                               |          |           |            |            |                          |
| Driftserfarenheter om kapacitetsproblem och missfärgat vatten.                                                                                                                                                             |          |           |            |            |                          |
| Rapporter <ul style="list-style-type: none"> <li>• VA-planer</li> <li>• Översiktsplaner</li> <li>• Detaljplaner</li> <li>• Särskilda avtal om systemet (till exempel avtal om in- och utflöde med andra system)</li> </ul> |          |           |            |            |                          |
| Särskilt juridiskt avtal eller texter om systemet.                                                                                                                                                                         |          |           |            |            |                          |
| Tidigare modellers modell-filer, resultatfiler, GIS-filer, syfte och scenarier.                                                                                                                                            |          |           |            |            |                          |



---

## Bilaga B Checklista för uppbyggnad av modellen

|    | Beskrivning                       | Filnamn, typ och datum | Färdigt<br>(Initialer<br>Datum) | Granskat<br>(Initialer Datum) |
|----|-----------------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1  | Import av ledningsnät             |                        |                                 |                               |
| 2  | Råhet på ledningarna              |                        |                                 |                               |
| 3  | Import av reservoarer             |                        |                                 |                               |
| 4  | Pumpar                            |                        |                                 |                               |
| 5  | Tryckregleringar                  |                        |                                 |                               |
| 6  | Styrningar av pumpar och ventiler |                        |                                 |                               |
| 7  | Vattenförbrukningar               |                        |                                 |                               |
| 8  | Förbrukningsmönster               |                        |                                 |                               |
| 9  | Läckage                           |                        |                                 |                               |
| 10 | Stabilitet simulering             |                        |                                 |                               |
| 11 | Kalibrering                       |                        |                                 |                               |

## Bilaga C Ekvivalent råhetstal (k-värde)

Rekommenderade råhetstal (k-värde) för ledningar i god kondition hämtade ur P110, Tabell 4.16 samt nya ledningar hämtade ur P114, Tabell 4.1.

| Material | Råhetstal för nya huvudledningar (P114)<br>k (mm) | Råhetstal för nya distributionsledningar (P114)<br>k (mm) | Råhetstal för ledningar med god kondition, (P110)<br>k (mm) |
|----------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Betong   | 0,5                                               | 1,0                                                       | 1,0                                                         |
| Gjutjärn |                                                   |                                                           | 1,0                                                         |
| Stål     |                                                   |                                                           | 1,0                                                         |
| PE       | 0,2                                               | 0,5                                                       | 0,2                                                         |
| PVC      |                                                   |                                                           | 0,2                                                         |
| GAP      | 0,2                                               | 0,5                                                       |                                                             |

Ekvivalent råhetstal (k-värde) hämtade ur "Byggformler och tabeller" (Johannesson & Vretblad, 2011).

| Material                     | k (mm)      |
|------------------------------|-------------|
| Rör av glas, koppar, mässing | 0 – 0,02    |
| Dragna stålrör, nya          | 0,02 – 0,05 |
| Galvaniserande järnrör       | 0,15        |
| Gjutjärnsrör, nya            | 0,25        |
| Järn- och stålrör, rostiga   | 0,5 – 2     |
| Betongrör                    | 0,2 – 0,8   |
| Trätuber                     | 0,3 – 0,5   |
| Sprängd bergtunnel           | 100 – 500   |

---

Ekvivalent råhetstal (k-värde) hämtade ur ”Hydraulik för samhällsbyggnad” (Häggström, 2009).

| Material                              | k (mm)    |
|---------------------------------------|-----------|
| Gjutjärn, nya huvudledningar          | 0,1       |
| Gjutjärn, nya övriga ledningar        | 0,2 – 0,5 |
| Gjutjärn, i burk, något rostangripna  | 1,0       |
| Stålrör, nya (sömlösa eller svetsade) | 0,1 – 0,2 |
| Stålrör i bruk, något rostangripna    | 0,5       |
| Stålrör i bruk, starkt rostangripna   | 1 – 5     |
| Kopparrör, d < 200 mm                 | 0,01      |
| PE och PVC, d < 200 mm                | 0,01      |
| PE och PVC, d > 200 mm                | 0,05      |
| GAP (Glasfiberarmerad polyester)      | 0,1       |

---

# Bilaga D Mätprotokoll tryckmätning

Mätare nr: \_\_\_\_\_

Mätplats: \_\_\_\_\_

Mätning påbörjad: Datum \_\_\_\_\_ Klockslag \_\_\_\_\_

Mätning avslutad: Datum \_\_\_\_\_ Klockslag \_\_\_\_\_

Loggningsintervall: \_\_\_\_\_

Mätplatsens plushöjd i marknivå: \_\_\_\_\_

Mätarens placering i förhållande till marknivå: \_\_\_\_\_

| Datum | Tid | Åtgärd | Kommentar |
|-------|-----|--------|-----------|
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |
|       |     |        |           |

---

# Bilaga E Förslag på rapportstruktur och rubriker i modelldokumentation

1. Bakgrund
2. Ledningsnät
3. Friktionsförluster
4. Höjdsättning
5. Tryckzoner
6. Reservoarar
7. Tryckstegringar
8. Tryckregleringar
9. Styrningar
10. Avancerade styrregler
11. Vattenförbrukning
12. Förbrukningsmönster
13. Utläckage
14. Mätning av flöde och tryck
15. Flödesbalans
16. Tryckförlustkalibrering
17. Scenariokörningar
18. Modellversioner
  - A. Aktuell modell
  - B. Scenarier

# Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling  
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL [svensktvatten@svensktvatten.se](mailto:svensktvatten@svensktvatten.se)

[www.svensktvatten.se](http://www.svensktvatten.se)