

# Modelleerimise põhialused

## Sisujuht

Modelleerimise põhialused .....	1
Ülevaade veevarustuse ajaloolisest arengust .....	3
Ülevaade veevarustuse ajaloolisest arengust .....	7
Lähtepunkt .....	7
Tarbijad.....	7
Transportimine .....	7
Veevõrgu simulatsioon .....	8
Mudelite rakendused .....	9
Tuleviku prognoos .....	9
Renoveerimisplaan.....	9
Tulekaitstesüsteemide disain .....	9
Veekvaliteedi hinnang .....	10
Energeetika.....	10
Igapäevane opereerimine .....	10
Modelleerimise protsess .....	11
Referentsid .....	12
Modelleerimise teoreetilised alused .....	13
Sissejuhatus .....	13
Peamised arvutusvalemid .....	14
Erikaal .....	14
Viskoossus .....	14
Viskoossus modelleerimise tarkvaras .....	15
Vedeliku kokkusurutavus .....	16
Küllastunud aururõhk.....	17
Rõhu mõiste .....	17
Voolukiirus.....	18
Voolamisrežiim .....	19
Energia mõiste.....	20
Hõõrdesurvekaod .....	21
Kohtsurvekaod.....	25
Pumpade modelleerimine .....	28
Sarnasuskriteeriumid.....	28
Veevõrkude hüdraulika .....	32
Massi jäävuse seadus .....	32

Energia jäävuse seadus.....	32
Veevõrguprobleemide lahendamine.....	33
Survetorustike liigitus.....	35
Veevõrkude geomeetria.....	36
Hargvõrgu arvutamine .....	37
Ringvõrgu arvutamine .....	37
Hardy-Cross meetod.....	38
<i>Newton-Rapshon</i> meetod .....	39
Lineaarse teooria meetod .....	41
Veekvaliteedi modelleerimine .....	42
Transport torudes.....	42
Segunemine sõlmedes.....	42
Segunemine mahutites.....	42
Keemiline reaktsioon.....	43
Veekvaliteedi simulatsiooni teised tüübid .....	45
Veekvaliteedi modelleerimise lahendusmeetodid.....	46
Referentsid .....	48
Tarbimine .....	49
Sissejuhatus.....	49
Põhimõisted.....	49
Baastarbimine.....	50
Andmete allikad.....	50
Tarbimiste jagamine.....	50
Tarbimiste kategooriad .....	53
Massi tasakaal .....	54
Ühiktarbimiste kasutamine .....	54
Registreerimata vesi.....	55
Tarbimise ebaühtlus .....	56
Tarbimise kordajad.....	56
Maksimaalsed kordajad.....	56
Tarbimisprofiilid .....	56
Tarbimisgraafikute loomine .....	57
Tarbimisgraafiku algushetk .....	59
Tarbimiste prognoos .....	60
Meetodid tuleviku tarbimiste prognoosimiseks .....	60
Tulekustutusvesi.....	61
Ülevaateid rahvusvahelistest standarditest.....	62
Referentsid .....	63

## Ülevaade veevarustuse ajaloolisest arengust

- 1500 B.C. Esimesed kasutusel oleva veetorud (Kreeta saarel). Varasemalt on küll tuntud vabapinnaga voolukanalid, kuid mitte torusid (kinnised süsteemid).
- 250 B.C *Archimedes'* printsiip vedeliku üleslükkejõu kohta.



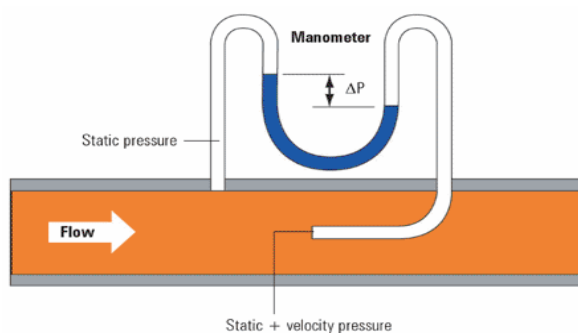
Allikas : Ref #01

- 100 A.D. Rooma akveduktid.



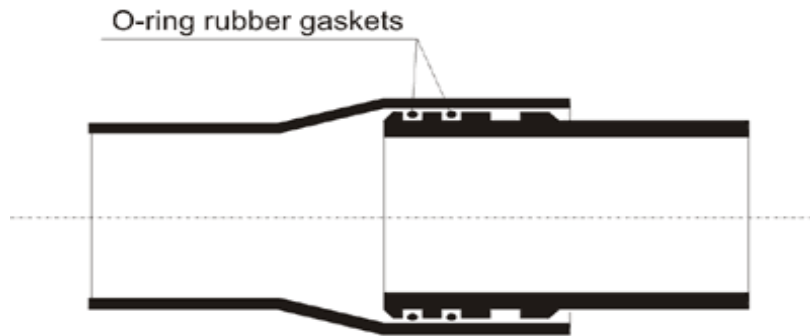
Allikas: Ref #02

- 1455 Esimene malmtoru.
- 1652 Esimesed veetorud rajatakse USA-s (Boston).
- 1664 *Pitot* toru (vedeliku voolukiiruse mõõtmiseks).



Allikas: Ref #03

- 1738 *Bernoulli* "Hydrodynamica".
- 1754 Esimene veevõrk USA-s (Pennsylvania).
- 1770 *Antoine Chezy* survekao valem ( $v^2/R \cdot s$  - konstant).
- 1785 Torude muhvühendus.



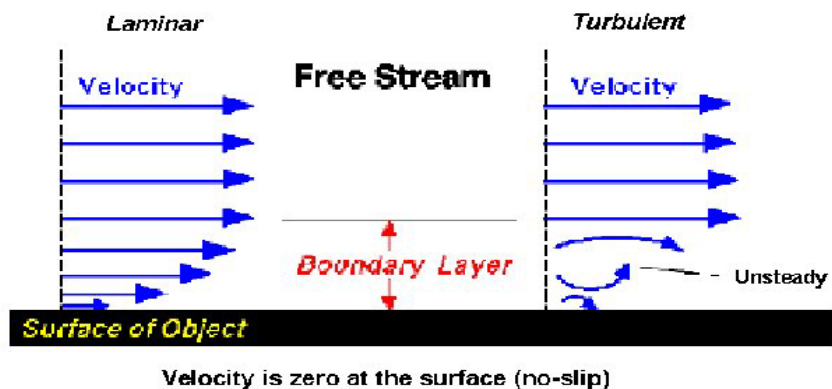
Allikas: Ref #04

- 1839 Hagen-Poiseuille valem (survekadu laminaarses voolus).
- 1843 St. Venant'i võrrandid (Navier-Stokes).
- 1845 Darcy-Weisbach survekao valem.
- 1878 Esimene automatiseeritud sprinklersüsteem (tulekustutussüsteem).
- 1881 American Water Works Association (AWWA) asutamine.



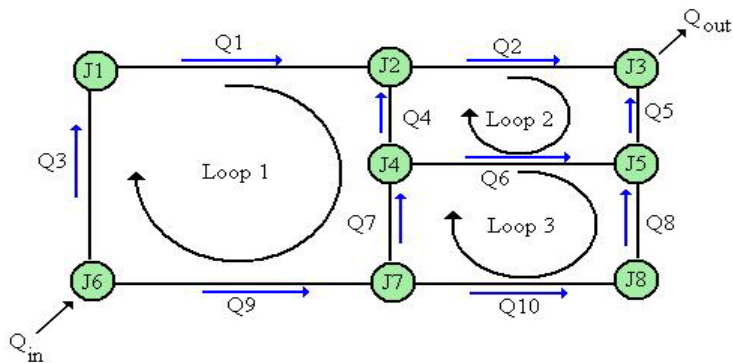
Allikas: Ref #05

- 1883 Reynolds'i arv (laminaarse ja turbulentsse voolu režiimid).
- 1906 Hazen-Williams'i võrrand.
- 1900-1930 Piirikihi teooria (vedeliku ja toru seina vaheline ala), Moody diagrammi teke



Allikas: Ref #06

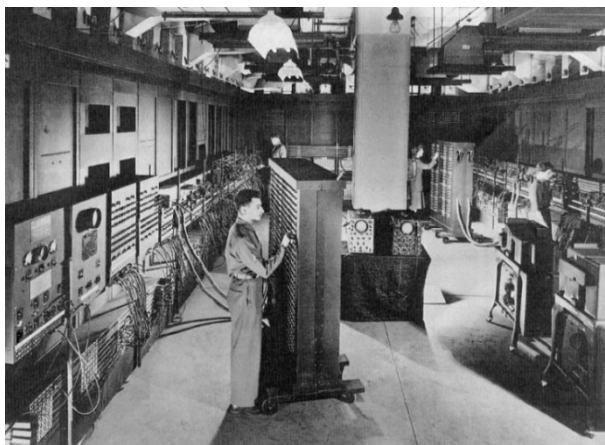
- 1920ndad Tsementeeritud kihiga veetorud (vähendamaks korrosiooni, lihtsustada puhastamist).
- 1921 Esimesed standardid *Hydraulic Institute Standards* poolt (pumpadele seatud nõuded).
- 1936 Hardy Cross meetod (survekadude arvutuskeem keerukamates süsteemides, käsitsi arvutused).



Allikas: Ref #07

- 1938 Colebrook White võrrand ( $D-W f$  määramiseks).
- 1940 Hunter kõverad (ühiktarbimis-diagrammid, samaaegse kasutamise tõenäosusprintsip).
- 1944 Moody diagramm publitseeritakse.
- 1950ndad Esimesed digitaalarvutid (ENIAC, Uviac).

Nende abil suudeti tõestada, et arvutid suudavad lahendada keerukaid numbrilisi ülesandeid – avanes tee programmide loomiseks.



Allikas: Ref #08

- 1956 Muhvühendus kummitihendiga.
- 1960-1970ndad Esimesed veevõrgu digitaalsed mudelid.
- 1963 Esimene PVC toru standard USA-s.
- 1970 Esimesed katsed optimeerida veevõrgumodeli disaini.
- 1970ndad Mudelid võimaldavad lahendada keerukamaid ülesandeid (rõhku reguleerivad klapid, EPS mudelid).
- 1975 Andmefailide kasutuselevõtt.
- 1975 AWWA C-900 PVC torude standard.
- 1976 Swamee-Jain võrrand (Colebrook-White võrrandi lihtsustus, ilmutatud kujul lahendamiseks).

$$f = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

- 1980 Esimesed lauarvutid.



Allikas: Ref #09

- 1980 algus Esimesed veekvaliteedi mudelid.
- 1985 "Battle of the Network Models", Anytown (optimeerimisülesanne).
- 1986 Dünaamilised veekvaliteedi mudelid.
- 1988 Gradient algoritm (baasalgoritm WaterCAD mudelis).
- 1991 GPS tehnoloogia kättesaadavus (koordinaatide määrang hüdraulilistele mudelitele)
- 2001 Automatiseeritud kalibreerimine (Genetic Algorithm).



$$E = \sum_{i=1}^P w_h (h_i^m - h_i)^2$$

Allikas: Ref #10

- 2002 Mudelite integreerimine GIS (geographic information system) andmebaasidega.

## Ülevaade veevarustuse ajaloolisest arengust

Veevarustussüsteemi peamine eesmärk on juhtida vett lähtepunktist (veepuhastusjaam – VPJ) tarbijani.



Lähtepunkt >



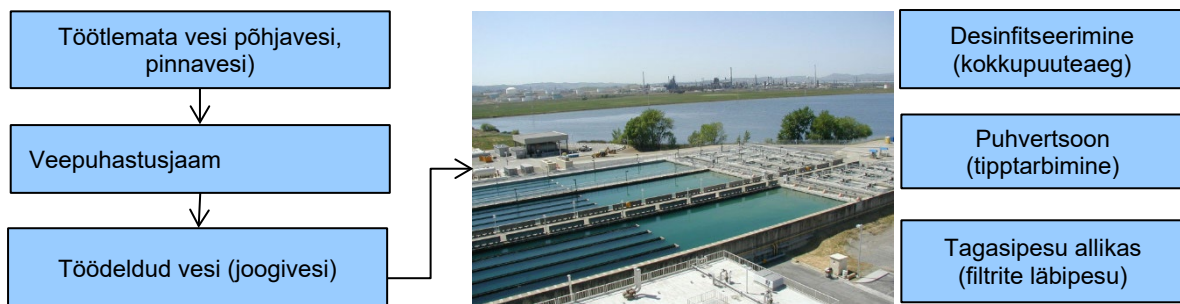
Torustik >



Tarbija

Allikas: Ref #11

### Lähtepunkt



Allikas: Ref #12

Põhjavee korral sette- ja puhastusmahutid üldiselt puuduvad (kõrgem veekvaliteet).

### Tarbijad

Veevõrgu tööd juhivad tarbijad. Tarbimiskäitumine (öine, tiptund) paneb paika veemahutite või -varude vajaduse, tulekaitsesüsteemide (lisamahutite, reservuaaride) parameetrid.

### Transportimine

Vee juhtimiseks allikast > tarbijani vajatakse torusüsteeme, pumpasid, klappe ning teisi seadmeid. Lisaks on kasutusel mahutid/reservuaarid, mis on kui kompensatorid tipp- ja miinimumtarbimise vahel.

Veevõrgusüsteem = torustik + mahutid + toetav infrastruktuur.

Torustik jaguneb peatorustikuks ning jaotustorustikuks.

#### Peatorustik

- Suured vahemaad
- Suuremad toru läbimõõdud

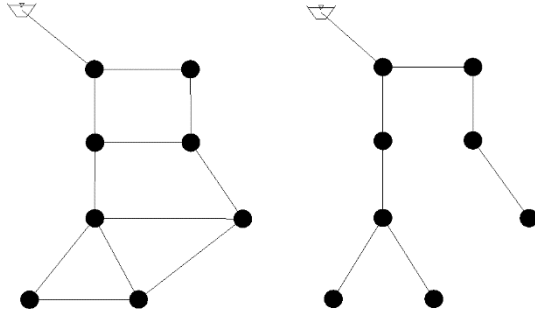
#### Jaotustorustik

- Vahetorud (peatorustiku ja tarbija vahel)
- Väiksemad toru läbimõõdud

Näiteks: Veepuhastusjaam > Mahutid (võib läbida mitut linna/linnaosa)

Jaotustorustikuks ei loeta veevõrgumudeli seisukohast majasiseseid torustike ja ka nn majaühendusi. Vastupidiseks näiteks on siinkohal sprinklersüsteemid.

Veevõrgusüsteemid jagunevad ring- ja hargvõrguks.



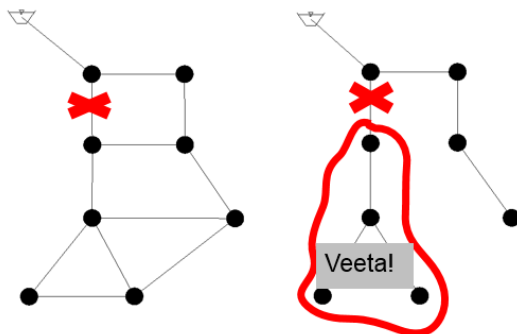
#### Ringvõrk

- Usaldusväärne
- Kulukam ehitada
- Veevaliteet?
- Linnad

#### Hargvõrk

- Usaldusväärne?
- Odavam ehitada
- Veevaliteet (vesi seisab vähem)
- Maapiirkonnad

Üldjuhul koosneb üks tänapäeva veevõrk ring- ja hargvõrgu kombinatsioonidest.



### Veevõrgu simulatsioon

Veevõrgu simulatsioon on reaalse olukorra esitamine mudeli kaudu. Mudel, see on teatud matemaatiline esitus (soovituslik õppeaine TTÜ-s: *Modelleerimise alused, EMR0050*). Mudelil võib olla nii ennustav kui ka tagantjärgi põhjuste hindamise roll. Kehtib reegel, et ennustada on odavam kui hiljem tagantjärgi likvideerida. Simulatsioonid jagunevad statsionaarseteks ning kestvus-simulatsioonideks.



## Mudelite rakendused

Veevõrgumudeleid saab kasutada ka teiste survesüsteemide (nt jahutussüsteemid, naftatorud, kokkusurumatute vedelike voolamine) uurimiseks. Veevõrgumudelite keerukus seisneb selles, et see peab viima vee sadade tuhandete (või miljonite) inimesteni – suur vastutuskoozem lasub siin veevõrgu operaatoril.



*Allikas: Ref #13*

## Tuleviku prognoos

Põhjused:

- Rahvastiku kasv, tarbimiskäitumise muutus

Mudeli otstarve:

- Kriitiliste survetsoonide hinnang
- Torustike renoveerimisplaan
- Pumplate rajamised
- Mahutite rajamised

## Renoveerimisplaan

Põhjused:

- Amortisatsioon, veekvaliteedi halvenemine

Mudeli otstarve:

- Veekvaliteedi modelleerimine (uued torud)

## Tulekaitsesüsteemide disain

Põhjused:

- Veevarustussüsteemi suutlikkus tagada suuremaid vooluhulkasid, jättes alles miinimumtarbimise

Mudeli otstarve:

- Hinnata torustike läbimõõtusid
- Selgitada välja kriitilised survetsoonid
- Lisapumpade, mahutite kasutuselevõtt

## Veekvaliteedi hinnang

Põhjused:

- Probleemid veekvaliteediga (maitse, värvus, lõhn)

Mudeli otstarve:

- Hinnata vee viibeaega erinevates tsoonides
- Hinnata desinfektorite liikumisteede ja koguseid

## Energeetika

Põhjused:

- Infrastruktuuri järel on järgmine suurem kuluartikkel kulutused energiale

Mudeli otstarve:

- Hinnata opereerimise karakteristikuid, pumpade energiatarvet

## Igapäevane opereerimine

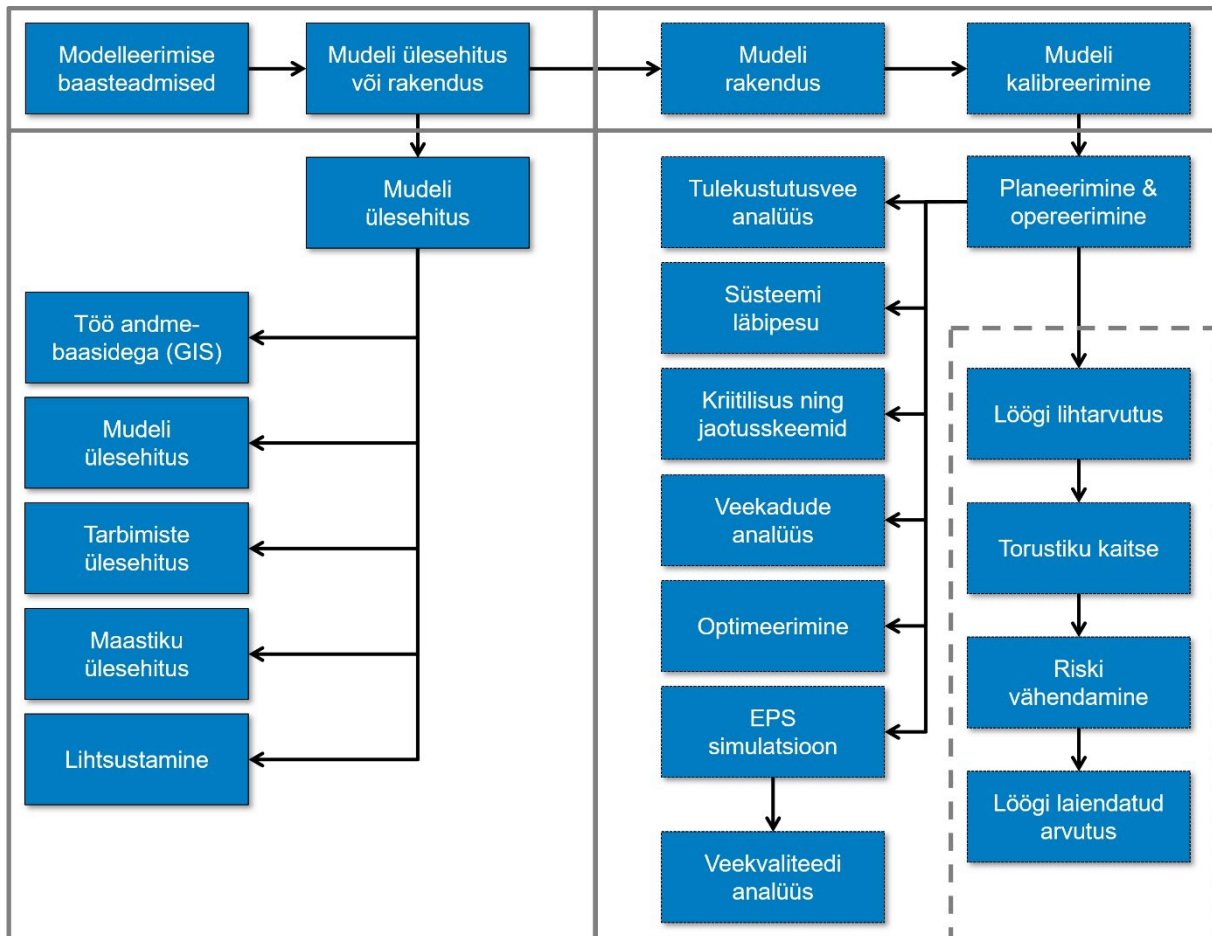
Põhjused:

- Reaalajas tagasiside veevarustussüsteemi töö kohta

Mudeli otstarve:

- Hinnata ajutiste veevarustuse katkestuse mõju
- Järgida reaalajas ning võtta vastu otsuseid, tagamaks normaaltingimustes opereerimine

## Modelleerimise protsess



Joonis. Ülevaade modelleerimise protsessist ja rakendustest.

## Referentsid

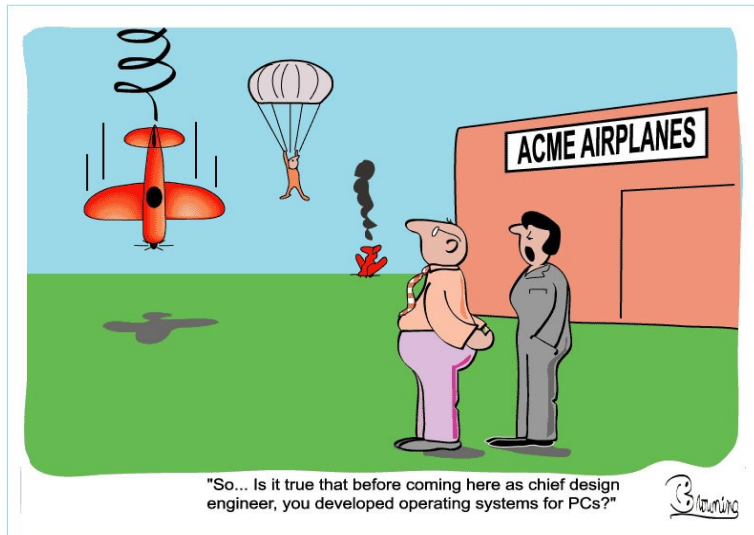
### Pildimaterjal

- Ref #01 Archimedes, <http://scienceprep.org/images/eureka.jpg>
- Ref #02 Emanuele, Point du Gard, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pont\\_du\\_Gard\\_Oct\\_2007.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pont_du_Gard_Oct_2007.jpg)
- Ref #03 Pitot toru, <http://www.spiraxsarco.com/images/resources/steam-engineering-tutorials/4/3/fig4.3.18.gif>
- Ref #04 The Bell and Spigot joint system, <http://www.cta-marine.hr/english/sarplast.htm>
- Ref #05 AWWA logo, <http://www.awwa.org>
- Ref #06 Boundary layer, <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/Images/boundlay.gif>
- Ref #07 Ted Dunsford, Pipe Net, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:PipeNet.jpg>
- Ref #08 First generation of computer, [http://fahmirahman.files.wordpress.com/2011/01/1\\_2.jpg](http://fahmirahman.files.wordpress.com/2011/01/1_2.jpg)
- Ref #09 Boffy b, IBM PC 5150, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:IBM\\_PC\\_5150.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:IBM_PC_5150.jpg)
- Ref #10 Chicken, <http://folk.uio.no/oivindb/bilder/chicken.gif>
- Ref #11 1) Water Treatment, <http://www.magnetation.com/home/industry-solutions/water-treatment> 3) <http://www.newbedfordguide.com/wp-content/uploads/2011/06/new-bedford-guide-tap-water.bmp>  
2) Installing 600 Treated Water pipe, <http://www.dayton-knight.com/projects/water/EagleLakeMbraneWTP/Installing%20600%20Treated%20Water%20pipe.JPG>  
3) <http://www.newbedfordguide.com/wp-content/uploads/2011/06/new-bedford-guide-tap-water.bmp>
- Ref #12 Water Treatment, <http://www.magnetation.com/home/industry-solutions/water-treatment>
- Ref #13 1) Credit: Al Grillo/AP, Caribou near the trans-Alaska oil pipeline, [www.guardian.co.uk](http://www.guardian.co.uk)  
2) Section of the Alaskan Pipeline System, <http://sarahpalintruthsquad.files.wordpress.com>  
3) Credit: Wayne Eastep—Stone/Getty Images, Oil pipeline in Saudi Arabia, [www.britannica.com](http://www.britannica.com)

# Modelleerimise teoreetilised alused

## Sissejuhatus

Mudelil põhinev simulatsioon on matemaatiline aproksimatsiooni meetod, mis kirjeldab tegeliku veevõrgu süsteemi käitumist. Insener peab teadma matemaatilisi printsiipe, mis peituvad modelleerimistarkvarade sees.



Allikas: Ref #14

## Peamised arvutusvalemid

Vedelikke (*fluids*) kategoriseeritakse: (a) gaasilised ning (b) vedelad. Gaasilised vedelikud on oluliselt kokkusurutavamad, samas vedelad vedelikud on oluliselt tihkemad. Kõige olulisemad vedelike parameetrid veevõrgu simulatsioonis on:

$$\begin{aligned} \text{Erikaal:} & \quad \gamma = \rho \cdot g \\ \text{Vedeliku viskoossus:} & \quad \tau = \mu \frac{dV}{dy} \\ \text{Kokkusurutavus (vähemal määral):} & \quad E_v = -V \frac{dP}{dV} \end{aligned}$$

### Erikaal

Erikaal on vedeliku ruumalaühiku kaal.

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

kus:  $\gamma$  - vedeliku erikaal ( $\text{N/m}^3$ );  $\rho$  - vedeliku tihedus ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  - raskuskiirendus ( $\text{m/s}^2$ )

Kui arvestada veetihedusena  $1000 \text{ kg/m}^3$  (standardsel rõhul – 1 atm; standardsel temperatuuril –  $0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), siis igasugune temperatuuri või rõhu muutus mõjutab tihedust – ehkki veevõrgumodelleerimise seisukohalt pole need märgatavad.

### Viskoossus

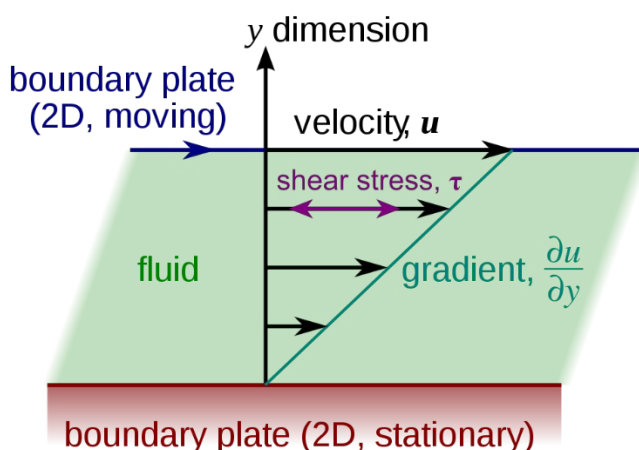
Viskoossus on vedelik omadus takistada oma osakeste liikumist üksteise suhtes.

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy},$$

kus:  $\tau$  – hõõrde- ehk tangentsiaalpinge ( $\text{kg / m}\cdot\text{s}^2$ );  $\mu$  – absoluutne (dünaamiline) viskoossus ( $\text{kg / m}\cdot\text{s}$ );  $dV/dy$  – kihtide vaheline kiirusgradient ( $1/\text{s}$ ).

### Viskoossuse füüsikaline tähendus (Newton'i valemi põhjal)

Kahe plaadi vaheline ruum on täidetud vedelikuga. Plaatide pindala on piisavalt suur, et servade olemuse võib jätta arvestamata.

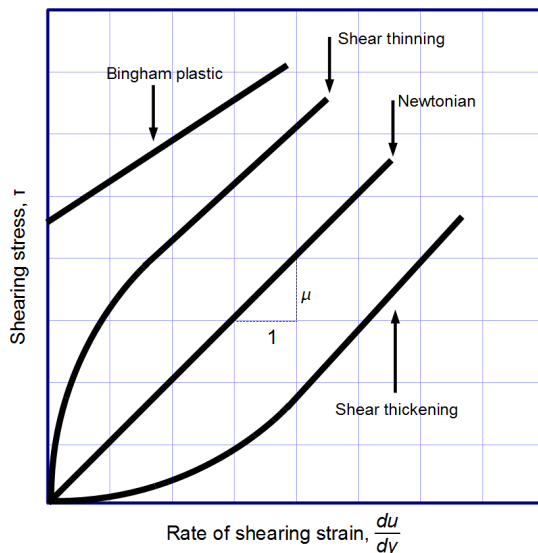


Allikas: Ref #15

$y$  - plaatide vaheline kaugus;  $V$  – ülemise plaadi kiirus (konstant alumise plaadi suhtes)

Vedelikud on nn mitte-libisevad (*no-slip*), mis tähendab, et need on kinnitunud plaatide külge. Seega kui  $V$  ja  $y$  suurusjärgud pole väga suured, siis on kiirusjaotus kahe plaadi vahel lineaarne. Enamike vedelike osas jääb viskoossus samaks sõltumata tangentsiaalpingest, mis sellele rakendatakse. Kõrge viskoossusega vedelikud on näiteks: siirup; melass. Madala viskoossusega vedelikud aga vesi; bensiin.

Vedelikud jagatakse kaheks suureks grupiks – *Newton'i* tüüpi vedelik ning *mitte-Newton'i* tüüpi vedelik. *Newton'i* tüüpi vedelik – ülemise plaadi kiiruse kasv põhjustab samaväärse tangentsiaalpingete kasvu (vesi; õhk) (nn normaalse viskoossusega vedelikud). *Mitte-Newton'i* tüüpi vedelik – tangentsiaalpinge muutus põhjustab viskoossuse muutuse (tint; reoveemuda) (anomaalviskoossusega vedelikud; nn *pseudo-plastic fluid*).



Joonis. Diagramm *Newton'i* ja *mitte-Newton'i* laadsete vedelike kohta. Enamik vedelikke, mida võrgumudelites kasutatakse langeb siiski *Newton'i* vedelike gruppi ja seega eeldatakse seda ka võrrandite koostamisel (allikas: Ref #16).

- *Newtonian:* Vedelikud, millel on konstantne viskoossus (*Newton'i* tüüpi).
- *Shear thickening:* Viskoossus kasvab tangentsiaalpinge kasvuga.
- *Shear thinning:* Viskoossus kahaneb tangentsiaalpingega kasvades (pseudo-plastiline).
- *Bingham plastic:* Suurtel pingetel kui viskoosne vedelik, madalatel kui tahke keha (ideaalne plastik)

Viskoossus sõltub temperatuurist, mis omakorda on erinev vedelike ja gaaside juures. Vedelike puhul vähendab üldjuhul temperatuuri kasv viskoossust. Gaaside puhul aga viskoossus kasvab ühes temperatuuri kasvuga. Samas tuleb tõdeda, et temperatuuri erinevused veevõrgu modelleerimise juures on tühised, seega arvestatakse modelleerimises viskoossust kui konstanti, mis võetakse temperatuuril 20 °C. Tulles tagasi viskoossuste kirjeldava valemi juurde, saame defineerida ka kinemaatilise viskoossuse mõiste.

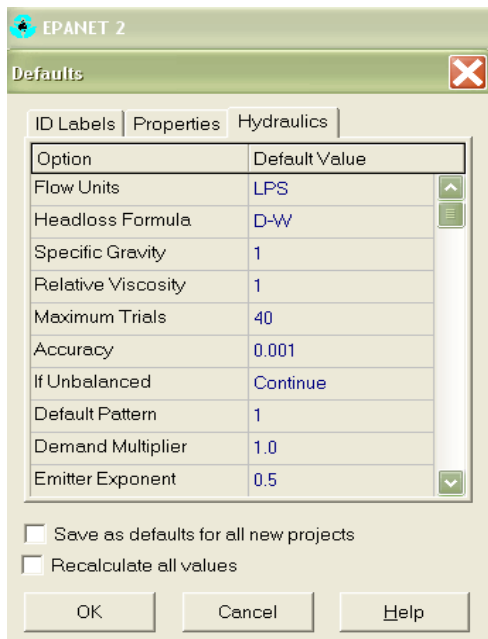
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{m^2}{s} \right)$$

Hüdraulilistes valemities kirjeldatakse vedeliku liikumist (vedeliku viskoossuse ja tiheduse vaheline sõltuvus) ühe muutujaga – kinemaatiline viskoossus.

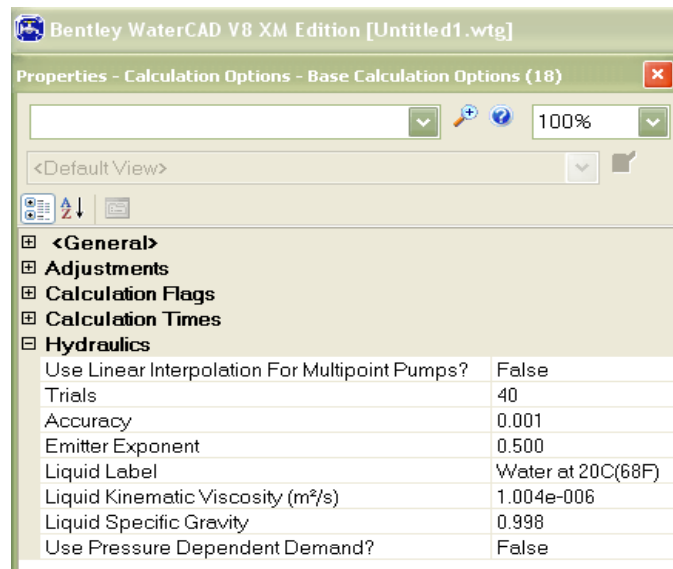
### Viskoossus modelleerimise tarkvaras

Hõõrdepinged esinevad toru seina ja vedeliku vahel, mis torus liigub. Mida kõrgem on vedeliku viskoossus, seda suuremad on ka hõõrdepinged vedelikus ja sellest tulenevalt on seda suuremad ka hõõrdesurvekaod torus. Modelleerimispaketid kasutavad vedeliku viskoossust toru pikkuse kohta

tuleva hõordesurvekao arvutamiseks. Modelleerija peab sisestama tarkvaradesse vedeliku (kui seda saab vahetada) viskoossuse ning tiheduse.



EPANET 2



Bentley WaterCAD

*Specific Gravity* – Modelleeritava vedeliku tiheduse suhe vee tihedusse (4 °C)

*Relative Viscosity* – Modelleeritava vedeliku kinemaatilise viskoossuse suhe vee viskoossusesse (20 °C juures).

Võimalus salvestada vedelikke andmebaasi.

Vee tihedus, viskoossus ja kinemaatiline viskoossus on vastavalt temperatuurile esitatud alljärgnevas tabelis.

Temperatuur (°C)	Tihedus (kg/m <sup>3</sup> )	Viskoossus (N·s/m <sup>2</sup> ) · 10 <sup>3</sup>	Kinemaatiline viskoossus (m <sup>2</sup> /s) · 10 <sup>6</sup>
0	998.8	1.781	1.785
4	1000.0	1.568	1.586
10	997.7	1.307	1.306
20	998.2	1.002	1.003
30	995.7	0.798	0.800
40	992.2	0.547	0.553

### Vedeliku kokkusurutavus

Vedeliku kokkusurutavus on füüsikaline omadus, mis seob omavahel kindla massiga vedeliku poolt hõivatud ruumala selle rõhuga.

$$E_v = -V \frac{dP}{dV},$$

kus:  $E_v$  – mahtelastusmoodul (Pa);  $P$  – rõhk (Pa);  $V$  – vedeliku ruumala (m<sup>3</sup>).

Kõik vedelikud on teataval määral kokkusurutavad. Veevõrkudes olevad kokkusurumise efektid on väga väikesed – eeldatakse, et vedelik ei ole kokkusurutav. Näiteks mahtelastusmooduliga  $2.83 \cdot 10^6$  kPa vett võib pidada kokkusurumatuks, kuna rõhu muutus üle  $1.35 \cdot 10^4$  kPa põhjustab vaid 0.5 % ruumala muutuse. Tuleb siiski tähele panna, et protsessides, kus käsitletakse hüdraulilist lööki, omab vedelike kokkusurutavus siiski tähtsat rolli. Liikuva vedeliku impulss on see, mis statsionaarse oleku



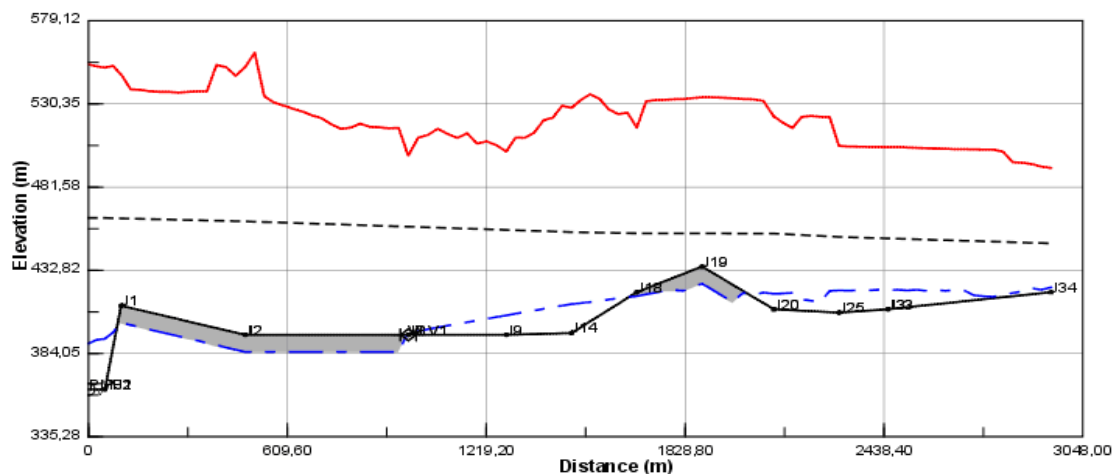
äkilisel “häirimisel” põhjustab piisavalt suuri rõhkusid, misjärel võivad ilmned vedeliku kokkusurumine ning toru sein paisumine – see kõik omakorda põhjustab purustava löögilaine fluktuatsiooni üle terve võrgu.

### Küllastunud aururõhk

Küllastunud aururõhk on rõhk, millel vedelik antud temperatuuril aurustub, s.t hakkab keema. Temperatuuri tõustes küllastunud auru rõhk suureneb ja vastupidi. Kui vedelik liigub kiirelt, võib rõhk mingis süsteemiosas langeda alla küllastunud auru rõhu ja kuigi vedelik pole kuum, hakkab ta keema. Homogeensuse kaotanud vedeliku puhul ei kehti tavalised hüdraulikaseadused. Tekib kavitatsioon.

Näide 1: Võtame suletud mahuti, mis on osalt täidetud veega. Rõhk selles süsteemis mõõdetakse koheselt peale vee lisamist ning seejärel uuesti mõne aja möödudes. Näitude põhjal saab öelda, et rõhk süsteemis on kasvanud. Rõhu kasv on tingitud vee aurustumisest – ning selle tulemusel kasvava küllastunud auru rõhu tõttu vedelikust üleval pool. Eeldades, et temperatuur ei muutu, saavutab rõhk ühel hetkel konstantse väärtuse, mis vastab sellel temperatuuril oleva küllastunud aururõhule – tasakaalule. Sellel hetkel on aurustumine ning kondensatsioon võrdsed. Küllastunud aururõhu piirväärtus kasvab temperatuuri kasvuga. See on ka põhjuseks, miks õhk niisketes kliimades on niiskem suvel kui seda on talvel ning samuti ka seda, miks veekeemise temperatuur on madalam kõrgematel kõrgustel.

Näide 2: Kui teatud osa vett, mis on rõhuga 1 atm ning ruumi temperatuuril, kuumutatakse 100 °C, siis hakkab vesi keema seetõttu, küllastunud aururõhk veele sellel temperatuuril on 1 atm. Samal viisil, kui vett hoida temperatuuril 20 °C ning rõhku vähendada 0.023 atm, hakkab vesi ka siis keema.



Joonis. Küllastunud aururõhk ja löögist tingitud surve max kõrgus.

Küllastunud auru rõhu mõistet saab rakendada veevõrkudes juhtudel, kus ümbritsev rõhk kukub väga madalale. Ilmneb pumba kavitatsioon, kui pumbatav vedelik langeb auru kotikestesse ning seejärel toimub äkiline kokkuvarisemine. Selleks, et see saaks juhtuda, peab olema rõhk torustikus võrdne või väiksem kui vedeliku küllastunud auru rõhk. Kavitatsiooni ilmnemisel võib tunduda heliliselt, et pumbatakse “jämedat liiva”. Kavitatsioon võib omakorda rikkuda (lõhkuda) toru seinad ning pumba komponente. Kavitatsioonist tuleb lähemalt juttu ka hüdraulilise löögi teema juures.

### Rõhu mõiste

Hüdrostaatiline rõhk (*pressure*) on esitatav järgmise seosega:

$$p = \rho gh ,$$

kus:  $p$  – vedeliku tihendus;  $g$  – raskuskiirendus;  $h$  – vedeliku samba kõrgus (m)

Samast valemist saame tuletada survekõrguse (*pressure head*):

$$h = \frac{p}{\rho g} = \frac{p}{\gamma}$$

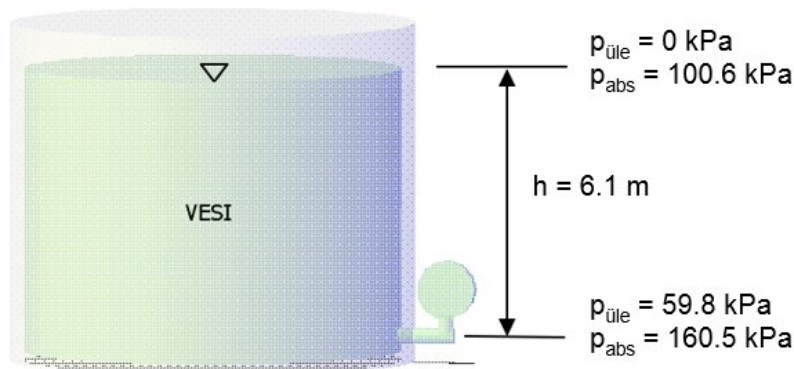
Olulisemad põhimõisted on veel:

- Atmosfääriline rõhk – Maa atmosfääri kaalust tingitud. See on rõhk, mis on mõõdetud absoluutse nulli järgi (täielik vaakum).
- Absoluutne rõhk (*abs pressure*) – rõhk, mis on mõõdetud absoluutse nulli suhtes (täielik vaakum)
- Ülerõhk (*gauge pressure*) – rõhk, mis on mõõdetud atmosfäärilise rõhu suhtes (manomeeterrõhk).

Omavahel saab neid siduda järgmiselt:

$$p_{abs} = p_{üle} + p_{atm}$$

Juhul, kui ülerõhk (paiknedes maapinnal) on avatud atmosfääri, registreerib mõõteseade nullväärtuse. Juhul, kui ülerõhk on negatiivne (rõhk allapoole atmosfäärilise) – siis nimetatakse seda negatiivset rõhku vaakumiks. Enamikes hüdraulilistes rakendustes kasutatakse mõistet (sh ka veevõrkude analüüs) ülerõhku. Absoluutse rõhu kasutamine omab väga väikest tähendust (väärtust), kuna sellisel juhul on kõiki ülerõhkusi suurendatud atmosfäärilise rõhu võrra. Lisaks on ülerõhku parem mõista, kuna rõhust rääkides, me tavaliselt ei arvesta atmosfäärilisi efekte.



Joonis. Näide ülerõhu/absoluutrõhu omavahelisest seosest.

## Voolukiirus

Torustikus olevat voolukiirust saab esitada järgmise seosega:

$$v = \frac{Q}{A},$$

kus:  $v$  – keskmine vedeliku kiirus (m/s);  $Q$  – vooluhulk torus ( $m^3/s$ );  $A$  – toru ristlõige ( $m^2$ ).

Kuna tüüpiliselt räägime me ümarristlõikega torudest, siis saame voolukiiruse esitada ka järgmise seosega:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2},$$

kus:  $D$  – toru läbimõõt (m).

Ehkki vooluhulga põhiühik on ( $m^3/s$ ), kasutatakse modelleerimises tihtipeale ka ühikut (l/s). Toru läbimõõtu on aga lihtsam esitada millimeetrites. Sellest lähtuvalt saame ka eelnimetatud seoses teisendada:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \rightarrow \frac{Q(\frac{l}{s})}{D(mm)} \rightarrow 4 \cdot \frac{Q}{1000} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\left(\frac{D}{1000}\right)^2} = 1274 \cdot \frac{Q}{D^2}$$

## Voolamisrežiim

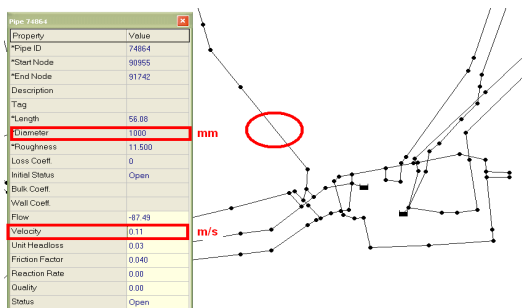
Voolamistest rääkimisel mainitakse ka Reynolds'i arvu (Re), mis on antud järgmise seosega (torudele):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Kus: D – toru läbimõõt (m); v – kiirus (m/s);  $\nu$  – kinemaatiline viskoossus (m<sup>2</sup>/s).

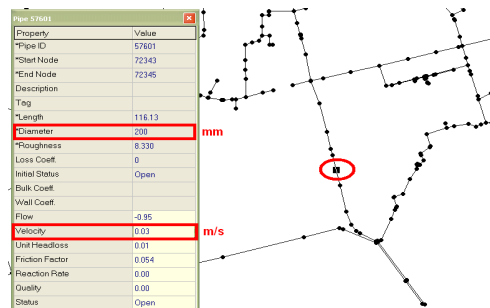
Reynoldsi arv iseloomustab voolamise režiimi. Kui  $Re < 2000$ , räägime laminaarsest (kihilisest) voolamisest. Kui  $Re > 4000$ , siis aga turbulentsest (keerilisest) voolamisest. Vahepealset osa nimetatakse ülemineku režiimiks. Üldkasutuses olevates süsteemides on voolamine alati turbulentsne.

Näide Reynolds arvude kohta reaalses süsteemis teatud vooluhulkade (voolukiiruste) korral.



Peatoru:

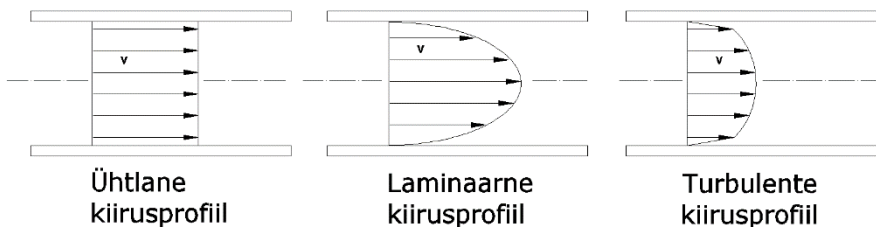
$$Re = 0.11 \cdot (1000 / 1000) / 10^{-6} = 110000$$



Hargtoru:

$$Re = 0.03 \cdot (200 / 1000) / 10^{-6} = 6000$$

Piki toru seinasid olevate hõõrdepingete tõttu pole kiirus torus ühtlane üle toru diameetri. Pigem on kiirus nullilähedane seina lähedal, ning maksimaalne kiirus on toru teljel.



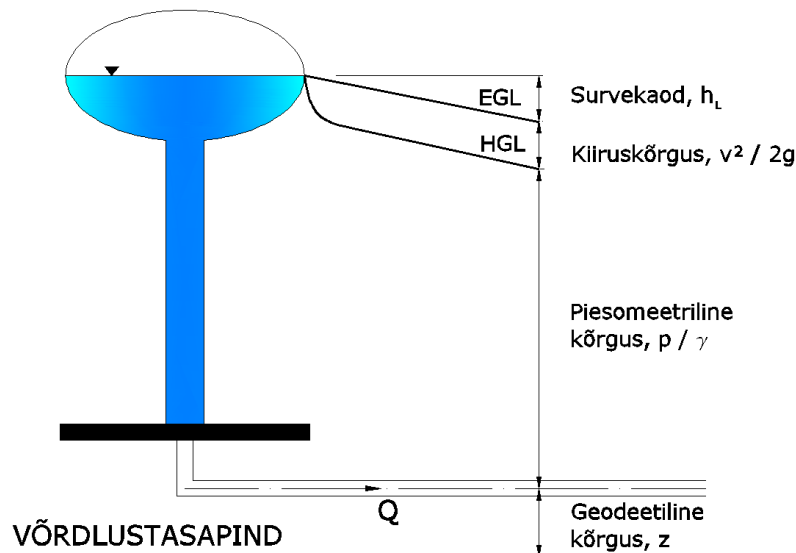
Sõltuvalt voolamise režiimist muutub ka kiirusepüür. Laminaarse voolamise korral osakesed liiguvad paralleelsete kihtidena – põhjustades suuri hõõrdepingeid üksteisega külgnevate kihtide vahel. Matemaatiliselt saab seda kujuvormi defineerida paraboolina. Laminaarses voolus saame rõhukadu toru segmendi lõikes vaadata kui funktsiooni vedeliku viskoossusest ning mitte läbi toru sisemise kareduse. Turbulentses voolus muutub kiirusepüür ebakorrapäraselt. Ehkki kiirusepüür on turbulentses voolus järsemate üleminekutega, ei erine kiirusepüüri profiil üle toru ristlõike niipalju, kui seda laminaarse voolu korral.

## Energia mõiste

Vedelikud omavad energiat kolmel viisil. Energia hulk sõltub vedeliku liikumisest (kineetiline energia), kõrgusest (potentsiaalne energia) ning rõhust (piesomeetriline energia).

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g},$$

kus:  $H$  – täissurve (m);  $z$  – kõrgus valitud nulljoonest (m);  $p$  – rõhk ( $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2$ ),  $\rho$  – vedeliku tihedus ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $v$  – kiirus (m/s);  $g$  – raskuskiirendus ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).



Hüdraulilises süsteemis võib vedelik omada kõiki kolme energia tüüpi samaaegselt. Koguenergiat, mis vastab vedeliku kaaluühikule, nimetatakse surveks.

- Kineetiline energia – kiiruskõrgus ( $v^2/2g$ )
- Potentsiaalne energia – maapinna kõrgus, kõrgussurve ( $z$ )
- Sisemine rõhu energia – piesomeetriline kõrgus, surve ( $p/\rho g$ )

Kuna tüüpiline energia ühik on (J), siis täissurve ühikuks on meeter (m). Süsteemi iga punkt omab kindlat survet. Joon, mis seob omavahel täissurve süsteemi pikkusega, nimetatakse energiajooneks (*energy grade line*). Survejoon ehk piesomeeterjoon (*hydraulic grade line*) = kõrgussurve + piesomeetriline kõrgus (surve). See on kõrgus, milleni vesi tõuseb liigendtorus, mis on ühendatud veetoruga ning on avatud atmosfääri.

Enamikes veevõrgusüsteemides omavad maapinnast tulenev ning piesomeetriline surve oluliselt suuremat kaalu kui kiirussurve. Seetõttu jäetakse kiirussurve tihtipeale lihtsalt arvestamata – ning modelleerivad töötavad peaaesjalikult survejoonega ehk piesomeetrilise joonega ning mitte energia joonega.

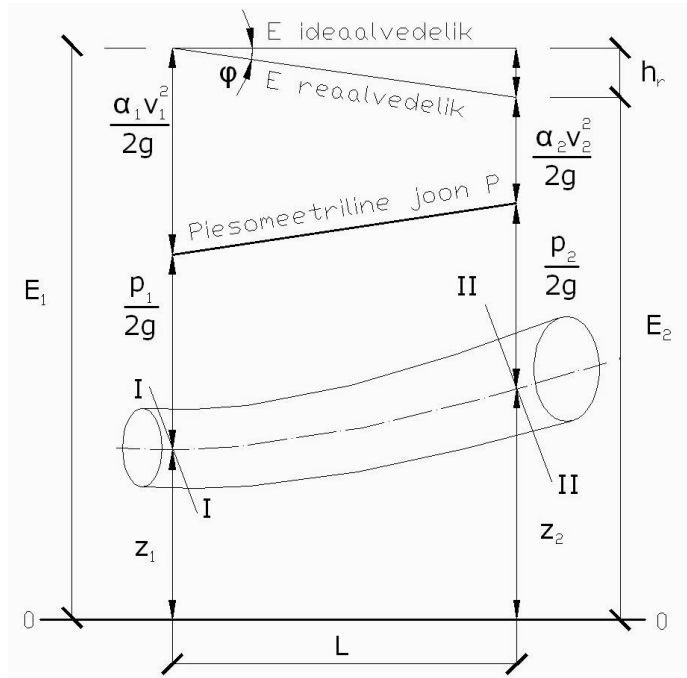
Seega kui anda maapinna kõrgusmärk (mingi nulli suhtes) ning survejoon, saame rõhu välja arvutada järgmisest seosest:

$$P = \rho g (HGL - z)$$

Energiakaod (survekaod) jagunevad kaheks: (a) hõõrdesurvekaod (hõõre piki toru seinu) ning (b) kohtsurvekaod (turbulentsist tingitud survekaod; turbulents tekib voolus liitmike ning seadmete läbimisel).

## Hõõrdesurvekaod

Vedeliku liikumisel torus tekivad toru seina ja vedeliku vahel hõõrdepinged. Hõõrdepinged on põhjustatud hõõrdumisest ning selle suurus sõltub: (a) vedeliku omadustest, mis toru läbib; (b) voolamise kiirusest; (c) toru sisemisest karedusest; ning (d) toru pikkusest ning läbimõõdust. Hõõrdesurvekado valemite põhimõtteline tuletus on toodud järgmisel joonisel:



Lähtuvalt ülal toodud joonisest, saame jõudude tasakaalu moodustada: (a) rõhkude erinevus lõigete 1 ja 2 vahel; (b) vedeliku omakaal lõigete vahel; (c) hõõrded toru seina ja vedeliku vahel lõikes.

Eeldades, et vooluhulk torus on konstantse kiirusega (kiirendus = 0), saab süsteemi tasakaalustada rõhkude erinevuse, raskusjõu ning hõõrdejõu summeerimisel.

Jõudude tasakaalu saab seega esitada kui:

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 - \bar{A} L \gamma \sin(a) - \tau_0 N L = 0,$$

kus:  $p_1, p_2$  – rõhud lõigetes 1 & 2 (Pa);  $A_1, A_2$  – ristlõiked lõigetes 1 & 2 ( $m^2$ );  $\bar{A}$  – keskmine ristlõige lõigete 1 & 2 vahel ( $m^2$ );  $L$  – lõigete vaheline kaugus (m);  $\gamma$  – vedeliku erikaal ( $kg / m^3$ );  $a$  – toru nurk horisontaali suhtes;  $\tau_0$  – hõõrdepinge piki toru seina ( $kg / m \cdot s^2$ );  $N$  – toru ristlõike ümbermõõt (m).

Asendades:  $\sin(a) = (z_2 - z_1) / L$

$$h_L = \tau_0 \frac{N \cdot L}{\gamma \cdot A} = \left( \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right),$$

kus:  $h_L$  – hõõrdesurvekadu (m);  $z_1, z_2$  – lõigete raskuskeskmete kõrgused (m).

Pane tähele, et kiiruskõrgust ei ole arvestatud, kuna toru läbimõõdud (ja seega ka kiiruskõrgused) on ristlõigetes samad.

Kui viimasest võrdusest avaldada hõõrdepinge:

$$\tau_0 = F(\rho, \mu, v, D, \varepsilon),$$

kus:  $\rho$  – vedeliku tihedus ( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu$  – absoluutne viskoossus ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $v$  – vedeliku keskmine kiirus ( $\text{m/s}$ );  $D$  – toru läbimõõt ( $\text{m}$ );  $\varepsilon$  – toru sisepinna karedus ( $\text{m}$ ).

Meenutusena olgu öeldud, et hõõrdepinget saab laminaarses voolus leida analüütiliselt läbi *Newton*'i viskoossuse seaduse. Hõõrdepinge on funktsioon vedeliku viskoossusest ning kiiruse gradiendist, vedeliku erikaalust (või tihedusest) ning torustiku läbimõõdust. Toru seina karedus mängib samuti rolli (mis tähendab seda, et mida karedam on toru sein, seda suuremad on hõõrdepinged).

Hõõrdesurvekaod *Darcy-Weisbach*'i valemi kaudu on esitatavad:

$$h_L = f \frac{Lv^2}{D2g} = \frac{8fLQ^2}{gD^5\pi^2},$$

Kus:  $f$  – Darcy-Weisbachi karedustegur ja antud kui:

$$f = F\left(\frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}\right) = F\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right),$$

kus:  $\varepsilon/D$  – toru suhteline karedus;  $\varepsilon$  – toru sisemine karedus.

*Darcy-Weisbach*'i (*D-W*) valem on saadud dimensioonanalüüsi kaudu. *Darcy-Weisbach*'i karedustegur on funktsioon samadest muutujatest, mis ka hõõrdepinge. Läbi dimensioonanalüüsi leitakse karedusteguri funktsioon. Karedustegur sõltub seega vedeliku kiirusest, tihedusest ning viskoossusest; toru suurusest, milles vedelik voolab ning toru sisemisest karedusest. Vedeliku kiirus, tihedus, viskoossus ning toru läbimõõt on esitatud *Reynolds*'i arvuna. Sisemine karedus on esitatud muutujana, mida nimetatakse ka suhteliseks kareduseks, mis saadakse kui {toru karedus} / {toru läbimõõduga}.

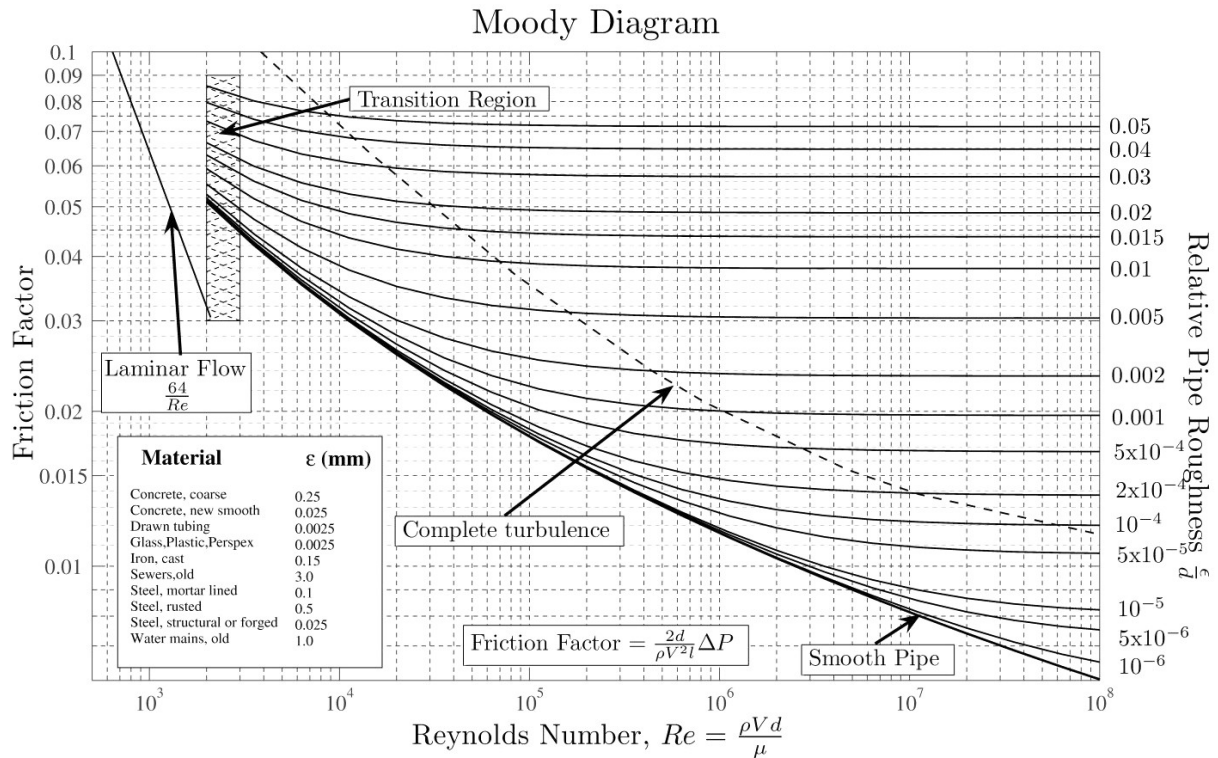
Toru tootjad esitavad uute torude sisemised karedused. Mõned üldistatud väärtused, sõltuvalt toru materjalist on toodud ka alljärgnevas tabelis.

Materjali nimetus		$\varepsilon$ (mm)
eesti keeles	inglise keeles	
Vask	copper, brass	$3.05 \times 10^{-2}$ - 0.9
Sepistatud raud, teras	wrought iron, steel	$4.6 \times 10^{-2}$ - 2.4
Malm (bituumenkihiga)	asphalted cast iron	0.1 - 2.1
Tsinkraud	galvanized iron	0.102 - 4.6
Malm	cast iron	0.2 - 5.5
Betoon	concrete	0.3 - 3.0
Pinnakatteta malm	uncoated cast iron	0.226
Pinnakattega malm	coated cast iron	0.102
Kaetud raud (kedratud)	coated spun iron	$5.6 \times 10^{-2}$
Tsement	cement	0.4 - 1.2
Sepistatud raud	wrought iron	$5 \times 10^{-2}$
Pinnakatteta teras	uncoated steel	$2.8 \times 10^{-2}$
Pinnakattega teras	coated steel	$5.8 \times 10^{-2}$
Puidust kanal	wood stave	0.2 - 0.9
Plast	PVC	$1.5 \times 10^{-3}$

Modelleerimispakettides on vajalik, et karedustegur oleks arvuliselt leitav, kaasates selleks mõnda lähendseost. Üheks enam-kasutatavamaks on *Colebrook-White* valem:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right)$$

Tegemist on karedusteguri ilmutamata funktsiooniga ( $f$  asub mõlemal pool võrdusmärki). Seega tuleb seda lahendada iteratiivselt, kuniks võrduse pooled kattuvad. Sisuliselt on *Moody* diagramm *Colebrook-White* valemi graafilise esitus ( $f$ -i leidmiseks). On huvitav märkida, et laminaarses voolus on karedustegur avaldatav lineaarse funktsioonina  $Re$  arvu kaudu. Samas kui täielikult turbulentses voolus (kõrge suhteline karedus ning suur  $Re$  arv) on karedustegur funktsioon suhtelisest karedusest. Erinevus tuleneb sellest, et laminaarse voolu korral on kareduse mõju väga väike, samas kui kõrgelt turbulentses voolus ei mängi hõõrdejõud enam nii suurt rolli.



Allikas: Ref #17

Lisaks *Colebrook-White* valemile kasutatakse just lihtsuse tõttu ka *Swamee-Jain (1976)* valemit, kus  $f$  on ilmutatud kujul:

$$f = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Samas tuleb selle valemi juures panna tähele selle kehtivuse piirkonda. Nimelt saame öelda selle valemi täpsuse vahemikuks 1%, kui on täidetud järgmised tingimused:

$$4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1 \cdot 10^8$$

$$1 \cdot 10^{-6} \leq \frac{\epsilon}{D} \leq 1 \cdot 10^{-2}$$

*Swamee-Jain* valemit kasutatakse just lihtsuse tõttu (ning piisava täpsusega) enamikes veevõrgumodelleerimise pakettides, et leida karedustegurit.

Toru karedust saab esitada ka *Hazen-Williams'i (H-W)* valemi järgi:

$$h_L = \frac{C_f L}{C^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852},$$

kus:  $C$  – Hazen-Williams  $C$ -faktor, toru võime mahtu edastada, mida suurem on  $C$ , seda siledam toru ja vastupidi;  $C_f$ – üleminekukoefitsient.

Hazen-Williams on enamjaolt kasutatav Põhja-Ameerikas. Mitmed parameetrid on samad, mis ka  $D-W$  valemis, kuid karedusteguri  $f$  asemel kasutatakse faktorit, mis kirjeldab toru võimet mahtu edastada. Mida suurem  $C$ , seda siledam toru ning vastupidi, mida väiksem  $C$ , seda karedam toru. Kirjandusest võib leida mõningaid väärtuseid  $C$ -faktorite kohta erinevatele toru materjalidele.

Toru materjal	C
Asbestos Cement	140
Brass	130-140
Brick sewer	100
<b>Cast-iron</b>	
New, unlined	130
10 yr. Old	107-113
20 yr. Old	89-100
30 yr. Old	75-90
40 yr. Old	64-83
<b>Concrete / concrete lined</b>	
Steel forms	140
Wooden forms	120
Centrifugally spun	135
Copper	130-140
Galvanized iron	120
Glass	140
Lead	130-140
Plastic	140-150
<b>Steel</b>	
Coal-tar enamel, lined	145-150
New unlined	140-150
Riveted	110
Tin	130
Vitrified clay (good condition)	110-140
Wood stave (average condition)	120

Ehkki  $C$ -faktor on toodud torudele erinevate vanustega, on juba Lamount (1981) leidnud, et  $C$ -faktorit ning toru vanust ei ole võimalik ühte kindlasse korrelatsiooni panna. Ta leidis, et  $C$ -faktorile avaldab omakorda mõju vee söövitav toime. Ta leidis neli erinevat trendi, mis jagunesid vee söövitava toime alusel ning sealt leiti vahemikud  $C$  faktoritele.

Teoorias peab  $C$ -faktorit muutma vastavalt voolu kiirusele (turbulentses režiimis):

$$C = C_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.081},$$

Kus:  $C$  – kiiruse kaudu redigeeritud  $C$ -faktor;  $C_0$  – refereeritud  $C$ -faktor;  $V_0$  – kiiruse väärtus, mille juures  $C_0$  määrati (m/s).

Teoreetilisest vaatepunktist peab  $C$ -faktorit toru juures varieerima voolu kiiruse järgi turbulentses tingimustes. Samas tuleb tõdeda, et nimetatud korrigeerimine omab väga väikest mõju. Kahekordne kiiruse kasv põhjustab vaid 5%  $C$ -faktori vähenemist. Selline erinevus jääb kareduse määramise vea piiridesse, ning enamik insenere eeldavad konstantset  $C$ -faktorit sõltumata vooluhulgast. Samas kui  $C$ -



faktor on leitud väga suurtel kiirustel ( $n_t > 3 \text{ m/s}$ ), siis võivad tekkida märgatavad vead, kui selle tulemusel kasutatavaid C-faktoreid kasutatakse survekao määramiseks madalatel kiirustel.

Lahtiste kanalite juures kasutatakse hõõrdesurvekao valemina ka *Manning* seost:

$$h_L = \frac{C_f L (nQ)^2}{D^{5.33}},$$

kus:  $n$  – Manning kareduskoefitsient;  $C_f$  – ülemineku koefitsient (SI: 10.29).

Mida suurem on  $n$ , seda suurem on toru sisemine karedus.

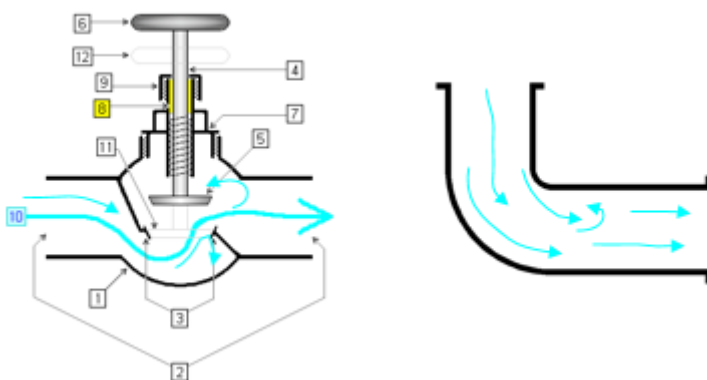
Materjal	Manning koefitsient	Materjal	Manning koefitsient
Asbestos cement	0.011	Corrugated metal	0.022
Brass	0.011	Galvanized iron	0.016
Brick	0.015	Lead	0.011
Cast iron, new	0.012	Plastic	0.009
<b>Concrete</b>		<b>Steel</b>	
Steel forms	0.011	Coal-tar enamel	0.01
Wooden forms	0.015	New unlined	0.011
Centrifugally spun	0.013	Riveted	0.019
Copper	0.011	Wood stave	0.012

Kokkuvõtvalt võib kolm enamlevinud hõõrdesurvekao valemit esitada järgmise tabeliga.

Hõõrdesurvekao valemite koondtabel	<i>Darcy-Weisbach</i>	<i>Hazen-Williams</i>	<i>Manning</i>
Põhineb	<i>Newton II</i> seadus	Eksperiment	Eksperiment
Kasutus	Euroopa	USA	(Austraalia)
Vedeliku valik	Mistahes	Vesi	Vesi
Survekadu Pikkusühiku kohta			

## Kohtsurvekaod

Survekaod esinevad ka klappides, põlvedes, kolmikutes, üleminekutes ning teistes süsteemi liitmikes/seadmetes. Neid survekadusid nimetatakse kohtsurvekadudeks. Survekaod on tingitud voolus tekkivatest turbulentsustest, kui voolav mass läbib liitmike.



Allikas: Ref #18

Kohtsurvekadusid saab leida järgmise seosega:

$$h_m = K_L \frac{v^2}{2g} = K_L \frac{Q^2}{2gA^2},$$

kus:  $h_m$  – survekadu tingituna kohtsurvekaost (m);  $K_L$  – kohtsurvekao koefitsient;  $v$  – kiirus (m/s);  $g$  – raskuskiirendus (m/s<sup>2</sup>);  $A$  – ristlõike pindala (m<sup>2</sup>);  $Q$  – vooluhulk (m<sup>3</sup>/s).

Kohtsurvekao koefitsiendid leitakse eksperimentaalselt ning vastavaid tegureid võib leida erinevates kirjandusallikatest. Veevõrgumodelleerimistes jäetakse tavaliselt kohtsurvekaod arvestamata, kuna need moodustavad hõõrdesurvekadudest vaid väga väikese osa. Samas tuleb rõhutada seda, et seal kus kiirused on suured ning liitmike on paigutatud järjestikku (pumplad, klappide sõlmed), tuleb kohtsurvekadusid siiski arvesse võtta, kuna selle põhjal saab süsteemi komponente täpsemalt valida. Kohtsurvekao tegurid (nii nagu ka toru karedustegurid) muutuvad mõneti kiirusega. Samas enamikes praktilistes võrguga seotud probleemides võetakse need konstantsetena.

Läbivoolude juures, mille ava on reguleeritav, saab kohtsurvekao koefitsiendi leida järgmisest seosest:

$$K_L = \frac{C_f D^4}{C_v^2},$$

Kus:  $D$  – läbimõõt (m);  $C_v$  – klapi koefitsient (m<sup>3</sup>/s) (kPa)<sup>0.5</sup>;  $C_f$  – ülemineku koefitsient (SI: 1.22).

Enamik klappide tootjaid pakuvad klapi koefitsiendi väärtust vastavalt klapi avanemise protsendile, mida saab siduda eelnevalt esitatud valemiga.

Selle asemel, et kohtsurvekadusid otse arvutustesse lisada, kasutati varasemalt mõistet ekvivalente toru pikkus kaasamaks kohtsurvekadusid.

$$L_e = \frac{K_L D}{f},$$

Kus:  $L_e$  – ekvivalentne toru pikkus (m);  $D$  – ekvivalentse toru läbimõõt (m);  $f$  – Darcy-Weisbach karedustegur.

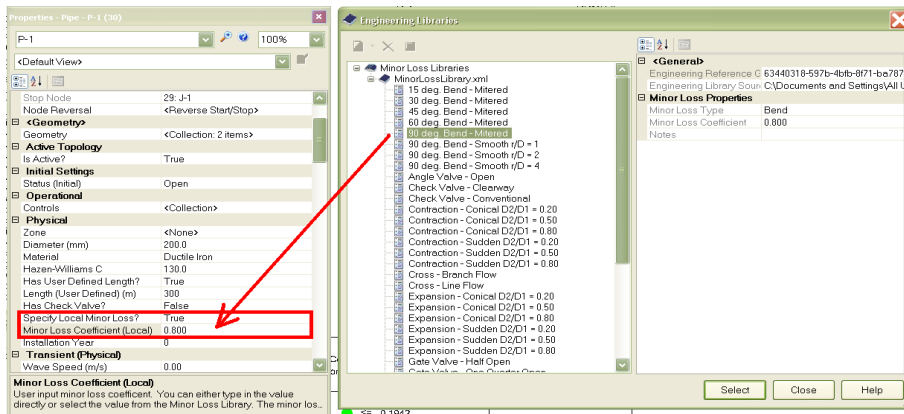
Selgemast selge, et selle valemi järgi on lihtsam arvutada. Samas kasutades tänapäevaseid modelleerimistarkvarasid, saab kohtsurvekao teguri väga lihtsalt juurde lisada. Lisanüansina võib veel välja tuua, et ekvivalente toru pikkus võib osutuda ebasobivaks ka siis, kui soovitakse arvutada kontsentratsioonide levikut, sest lisapikkus mõjutab otseselt ka aega – mis on veekvaliteedi seisukohalt väga oluline faktor.

Näide kohtsurvekao teguri lisamisest EPANET tarkvara baasil.

The image shows a screenshot of the EPANET software interface. On the left, a 'Pipe Properties' dialog box is open for pipe ID 116232. The 'Loss Coeff.' field is highlighted with a red box and contains the value 0.8. To the right, a 'Minor Loss Coefficients' table is displayed, listing various pipe fittings and their corresponding loss coefficients. A red circle highlights the 'Loss Coeff.' field in the pipe properties dialog, and a red arrow points from this field to the 'Minor Loss Coefficients' table.

Minor Loss Coefficients	
Globe valve, fully open	.0
Angle valve, fully open	.0
Swing check valve, fully open	.5
Gate valve, fully open	.2
Short-radius elbow	.9
Medium-radius elbow	.8
Long-radius elbow	.6
45 degree elbow	.4
Closed return bend	.2
Standard tee	
- flow through run	.6
Standard tee	
- flow through branch	.8
Square entrance	.5
Exit	.0

Näide kohtsurvekao teguri lisamisest Bentley WaterCAD tarkvara baasil.



Üldistatult saab toru hõordesurvekaod esitada takistustegurina ning seejärel, sõltuvalt valitud hõordesurvekao meetodist, välja tuua takistustegurite arvutuslikud seosed.

$$h_L = K_p Q^z,$$

kus:  $K_p$  – toru takistustegur ( $s^2 / m^{(3z-1)}$ );  $z$  – vooluhulga eksponent.

$K_p$  on omakorda leitav (sõltuvalt hõordesurvekao valemist):

$$\text{Darcy - Weisbach} : K_p = f \frac{L}{2gA^2 D} \quad (z = 2)$$

$$\text{Hazen - Williams} : K_p = \frac{C_f L}{C^z D^{4.87}} \quad (z = 1.852)$$

$$\text{Manning} : K_p = \frac{C_f L n^z}{D^{5.33}} \quad (z = 2)$$

Kohtsurvekaodusid saame lihtsustatult esitada:

$$h_m = K_M Q^2,$$

kus:  $h_m$  – kohtsurvekaod (m);  $K_M$  – kohtsurvekao takistustegur ( $s^2/m^5$ );  $Q$  – vooluhulk ( $m^3/s$ ).

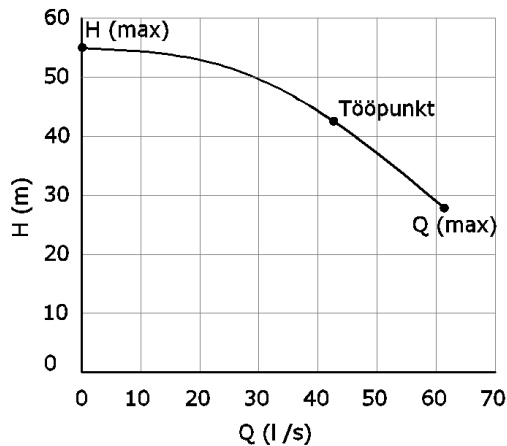
Kohtsurvekao takistustegur on sellisel juhul esitatav:

$$K_M = \frac{\sum K_L}{2gA^2},$$

kus:  $\sum K_L$  - üksikute kohtsurvekao koefitsientide summa.

## Pumpade modelleerimine

Pump on seade, mille abil viiakse energiat (mehaanilist energiat kasutades) võrku täissurvena (*total head*). Täissurvet, mida pump võrku annab, nimetatakse tõstekõrguseks (surve) ja see on funktsioon vooluhulgast (jõudlus), mis pumpa läbib. Pumba kõver defineerib lisatava surve ning läbitava vooluhulga omavahelise seose. Tegemist on mittelineaarse seosega, millest on lihtne näha, et kui vooluhulk suureneb, siis tõstekõrgus väheneb.



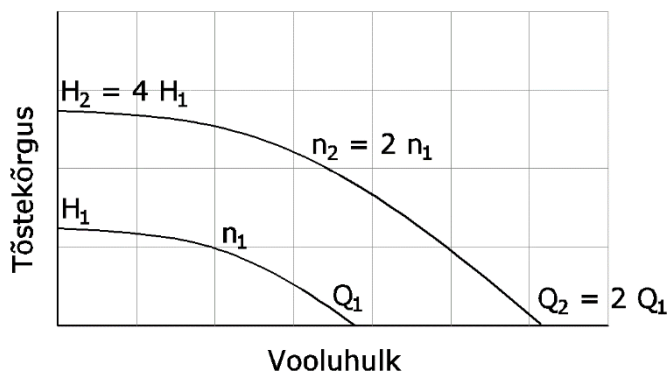
Joonis. Pumba graafik (karakteristlik kõver).

Pumba graafikut peab esitama matemaatilise seosena, et seda saaks modelleerimistarkvarades kasutada.

$$h_p = h_0 - cQ_p^m,$$

kus:  $h_p$  – pumba tõstekõrgus (m);  $h_0$  – pumba tõstekõrgus kui  $Q = 0$  (*shutoff head*), (m);  $Q_p$  – pumba vooluhulk ( $m^3/s$ );  $c, m$  – koefitsiendid, mis kirjeldavad pumba graafiku kuju.

Pumba graafikut on võimalik muuta pöörete arvu reguleerimisega. Lähtuvalt sarnasuskriteeriumitele on pumba vooluhulk võrdeline pumba pöörete arvuga ning pumba tõstekõrgus on võrdeline pumba pöörete arvu ruuduga. Teades pumba graafikut ühel kiirusel, saab välja arvutada teisel kiirusel oleva pumba graafiku.



### Sarnasuskriteeriumid

$$Q_{p1} / Q_{p2} = n_1 / n_2;$$
$$h_{p1} / h_{p2} = (n_1 / n_2)^2,$$

kus:  $Q_{p1}$  – pumba vooluhulk pöörete arvul 1 ( $m^3/s$ );  $n_1$  – pumba pöörete arv 1 (1/s);  $h_{p1}$  – pumba tõstekõrgus pöörete arvul 1 (m).

Sarnasuskriteeriumeid saab kasutada pumba tõstekõrguse leidmiseks pöörete arvu järgi:

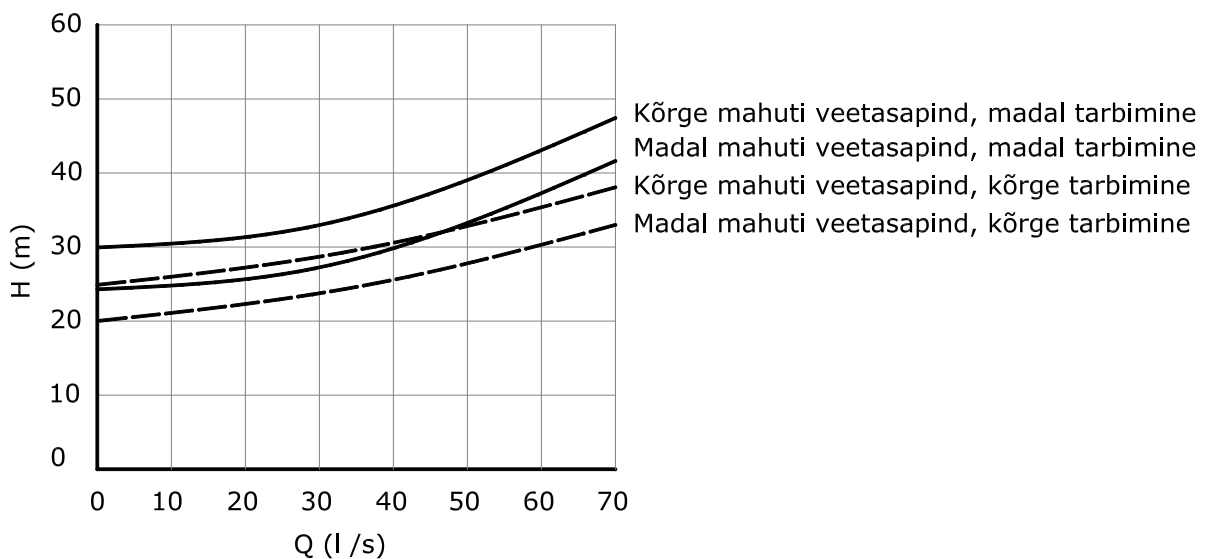
$$\left. \begin{aligned} h_p &= h_0 - cQ_p^m \\ Q_{p1} / Q_{p2} &= n_1 / n_2 \\ h_{p1} / h_{p2} &= (n_1 / n_2)^2 \end{aligned} \right| \Rightarrow h_{p2} = n^2 h_0 - cn^{2-m} Q_{p2}^m$$

$$n = n_2 / n_1$$

Lisaks pumba kõverale on vaja teada ka süsteemikõverat ehk võrgukarakteristikut. Pumba eesmärk on ületada kõrguslikust tulenevad erinevused ning survekaod, mis on põhjustatud toru karedusest ning liitmikest. Pumba poolt antav tõstekõrgus sõltub süsteemi karakteristikutest ning topoloogiast (ei sõltu aga pumba vooluhulgast) – nn staatiline tõstekõrgus. Samas hõõrde- ning kohtsurvekaod sõltuvad suuresti pumba läbivast vooluhulgast.

Süsteemikõveraid võib olla erinevaid. Nii nagu pumba karakteristik kõver on sõltumatu süsteemi kõverast, nii on süsteemi kõver sõltumatu ka pumba kõverast. Samas kui kindlale pumbale (kindlal kiirusel) vastab kindel pumba graafik, siis süsteemi kõveratest räägitakse tavaliselt grupi viisiliselt. Süsteemi kõver sõltub mahutite veetasapindadest ning tarbimistest (suurem või väiksem, vastavalt kellaajale).

Süsteemikõver (võrgukarakteristik) = staatiline tõstekõrgus + survekaod



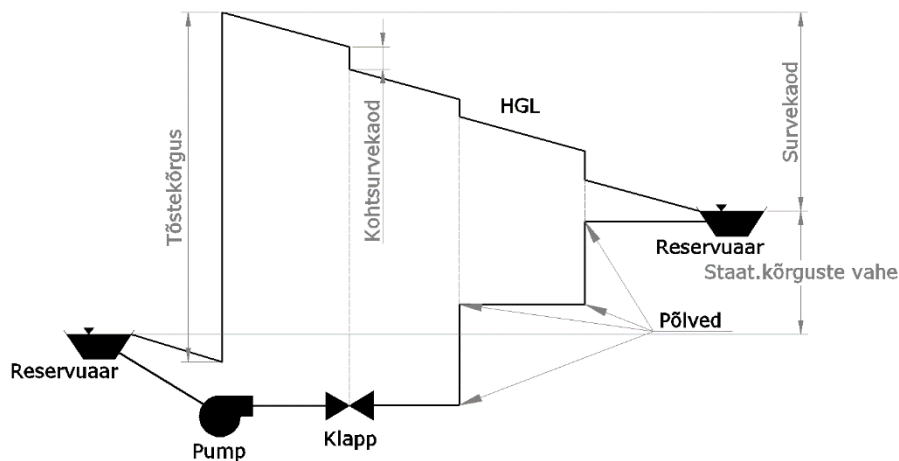
Süsteemi kõvera kahe punkti vahel saab kirja panna järgmise avaldisega:

$$H = h_{st} + \sum K_p Q^z + \sum K_M Q^2,$$

kus:  $H$  – täissurve (m);  $h_{st}$  – staatiline tõstekõrgus (m);  $K_p$  – toru takistustegur ( $s^2 / m^{3z-1}$ );  $Q$  – toru vooluhulk ( $m^3/s$ );  $z$  – koefitsient;  $K_M$  – kohtsurvekadude takistustegur ( $s^2/m^5$ ).

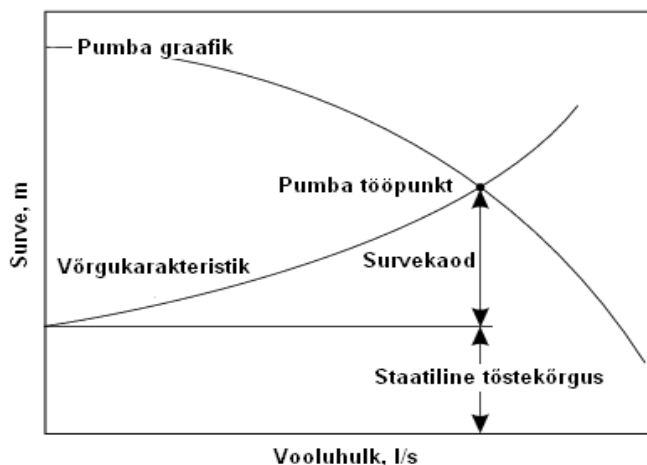
Seega survekaod ning kohtsurvekaod, mis on seotud iga toru segmendiga, summeeritakse piki kogu torustiku. Keerukama süsteemi korral on ühe ainukese võrduse kirjutamine ilmselgelt võimatu ning sellisel juhul tuleks kasutada hüdraulilist mudelit, et analüüsida süsteemi tervikuna.

Kasuks tuleb püüda visualiseerida survejoont (*HGL – hydraulic grade line*).

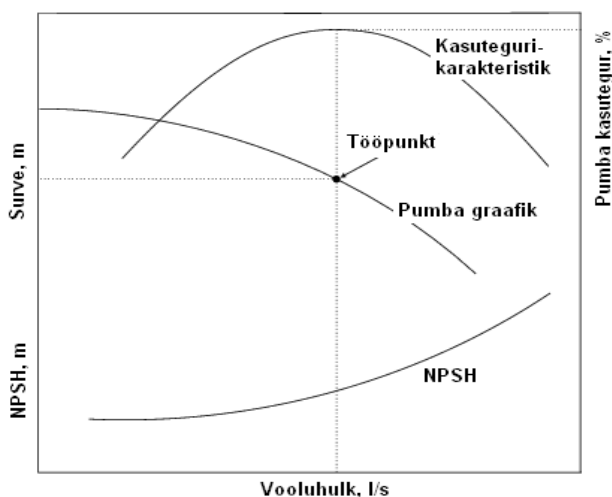


Joonis. Survejoone näide.

Kui pumba töögraafik ning süsteemi võrgukarakteristik lisada samadele graafilistele telgedele, siis vaid üks punkt asub nii pumba töögraafikul kui süsteemi võrgukarakteristikul. Lõikepunkt defineerib pumba tööpunkti, mis esitab pumba poolt lisatavad tõstekõrguse ning vooluhulga. Tõstekõrgus on surve, mida vajatakse staatilise surve ning teiste survekadude korvamiseks süsteemis.



Teised pumba käitumist iseloomustavad kõverad kirjeldavad veel võimsust, efektiivsust (tuleb juttu edaspidi).



Kuna operaatorid soovivad minimeerida energia hulka, mida kulutatakse süsteemi töös hoidmiseks, on oluline, et insener valib pumbad, mis töötaksid võimalikult efektiivselt. Pumba opereerimise kuludest tuleb juttu edaspidi.

Omaette nõue, mida tuleb pumba juures alati kontrollida on kavitatsioonivaru (*Net Positive Suction Head - NPSH*), see on rõhk, mis on vahetult pumba imitoru poolses otsas. Iga pump vajab, et *NPSH* ületaks teatud etteantud *NPSH* väärtuse selleks, et pumba sees olevad rõhud ei lange allapoole vedeliku aurustumisrõhku, mis põhjustaks kaviteerumist.

## Veevõrkude hüdraulika

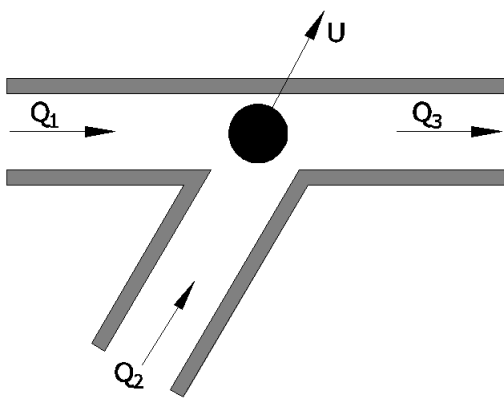
Hüdraulilise võrgu elemendid, mis on omavahel seotud, sõltuvad temaga külgnevatest või seotud elementidest. Kogu süsteem on aga seotud nii, et ühe elemendi tingimus peab olema kooskõlas kõigi teiste elementide tingimustega. Neid printsiipe nimetatakse: massi jäävuse seadus ning energia jäävuse seadus.

### Massi jäävuse seadus

Vedeliku mass, mis ühte torusse siseneb, peab sealt ka väljuma (kuna tavaliselt ei saa vedelikku ühte hüdraulilisse süsteemi niisama juurde tekkida ega ka sealt kaduda – hävineda).

$$\sum_{\text{torud}} Q_i - U = 0,$$

Kus:  $Q_i$  – sissevool sõlme läbi toru  $i$  ( $m^3/s$ );  $U$  – vesi, mis tarbitakse sõlmes ( $m^3/s$ ).



Märkus: Väljavoolud tähistatakse märgiga “-”.

Kui tehakse EPS (*extended period simulation*) arvutusi, ning süsteemis olevad mahutid võivad vett nii talletada kui seda süsteemi juurde anda, peab valemisse lisama veel ühe liikme.

$$\sum_{\text{torud}} Q_i - U - \frac{dS}{dt} = 0,$$

Kus:  $dS/dt$  – mahu muutus ( $m^3/s$ ).

Massi jäävuse valemit rakendatakse süsteemi igale sõlmele ning mahutile.

### Energia jäävuse seadus

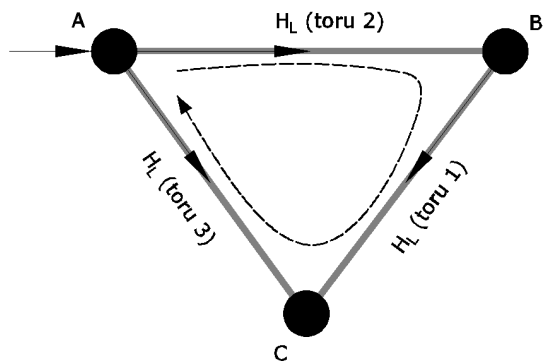
Mistahes võrgu kahe punkti vahel olev energia erinevus on võrdne pumba poolt antava lisaenergia ning energiakadudega torudes ja liitmikes, mis sellel samal rajal paiknevad. Hüdrauliliste süsteemide juures kirjutatakse see tavaliselt üles survetena:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + \sum h_p = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_L + \sum h_m,$$

kus:  $z$  – maapind ( $m$ );  $p$  – rõhk ( $kg / m^2s^2$ );  $\gamma$  – vedeliku erikaal ( $kg / m^2s^2$ );  $v$  – kiirus ( $m/s$ );  $g$  – raskuskiirendus ( $m/s^2$ );  $h_p$  – pumba poolt lisatav tõstekõrgus ( $m$ );  $h_L$  – survekadu torustikes ( $m$ );  $h_m$  – kohtsurvekadu ( $m$ ).



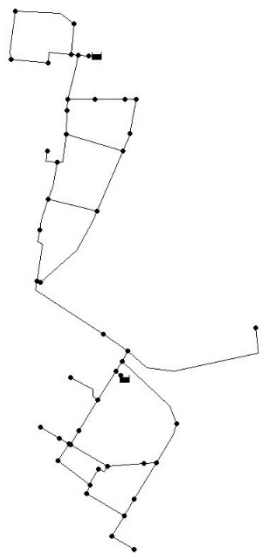
Selle võrduse saab kirja panna mistahes kahe punkti vahelisele rajale. Eriliselt huvipakkuvad rajajooned on aga need, mis asuvad reservuaaride või mahutite vahel (sest seal on survete erinevused teada), aga ka rajajooned, mis tervikuna annavad kokku ühe ringi ja energia muut peab seetõttu olema võrdne nulliga.



$$H_L(\text{toru 2}) + H_L(\text{toru 1}) - H_L(\text{toru 3}) = 0$$

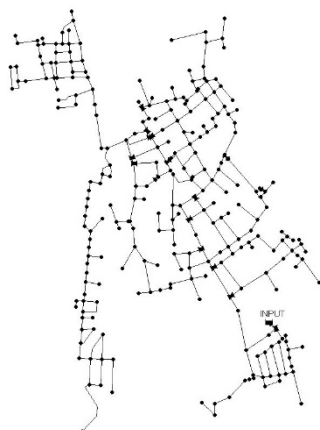
### Veevõrguprobleemide lahendamine

Reaalne veevõrgusüsteem ei koosne ühest ainsast torust ning seetõttu ei saa seda ka kirjeldada ühe ainsa massi jäävuse ning ühe ainsa energia jäävuse võrdusega. Tegelikult on vaja esitada iga süsteemi sõlme jaoks üks massi jäävuse võrdus ning üks energia jäävuse võrdus iga toru (või ringi) tarvis, mis sõltub kasutatavast meetodist. Seetõttu vajab reaalne veevõrk tuhandeid võrrandeid.



Statistics	
Number of Junctions	47
Number of Reservoirs	2
Number of Tanks	0
Number of Pipes	55
Number of Pumps	0
Number of Valves	0
Flow Units	LPS

Särevere alevik



Statistics	
Number of Junctions	290
Number of Reservoirs	1
Number of Tanks	0
Number of Pipes	325
Number of Pumps	0
Number of Valves	16
Flow Units	LPS

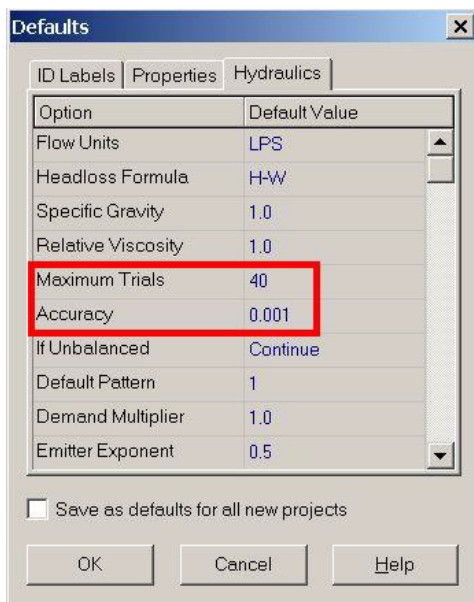
Rakvere



Statistics	
Number of Junctions	23834
Number of Reservoirs	32
Number of Tanks	0
Number of Pipes	24780
Number of Pumps	32
Number of Valves	5
Flow Units	LPS

Tallinn

Esimese süsteemse lahenduskeemi võrrandite lahendamiseks pakkus välja *Hardy Cross* (1936). Tänapäevane digitaalne ajastu võimaldab aga oluliselt efektiivsemal viisil neid võrduseid lahendada - maatrikskujul. Kuna energia võrrandid on mittelineaarsed (vooluhulga ja surve mõistes), ei saa neid otseselt lahendada. Selle asemel kasutatakse iteratiivseid meetodeid, kus esmalt hinnatakse lahendit ja seejärel asutakse seda järk-järgult parandama, kuniks kahe järjestikuse lahendi vaheline erinevus langeb ette antud vea piiridesse. Sellest hetkest alates loetakse hüdrauliline süsteem lahendatuks.

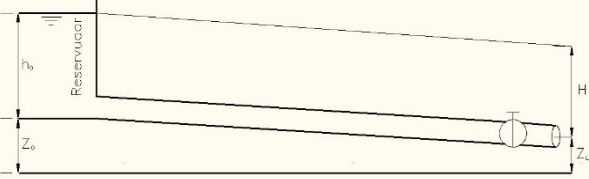
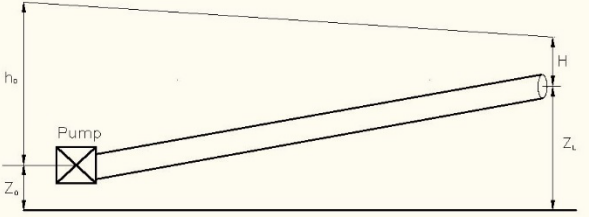
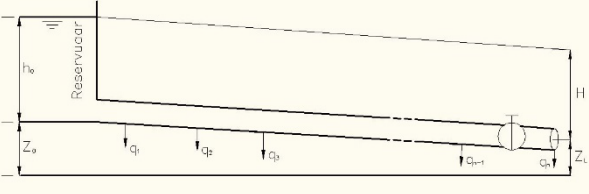
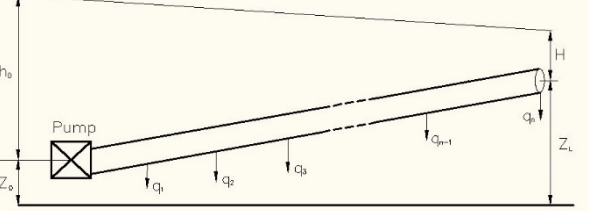


Joonis. Arvutustäpsuse seaded EPANET tarkvaras.

## Survetorustike liigitus

Survekaos järgi jagatakse torustikud: (a) lühikesed torustikud (arvestatakse nii koht- kui hõõrdesurvekadusid); (b) pikad torustikud (arvestatakse vaid hõõrdesurvekadusid). Kohtsurvekadude lisamiseks arvestatakse 5-10% välisvõrkude torustikele ning 10-30% sisevõrkude torustikele (hoonete veevõrk) lisaturvekadu. Pikad survetorustikud jagunevad omakorda: (a) liht- e. transiittorustikud; (b) liittorustikeks (jada- ja rööptorustik); (c) muutuva vooluhulgaga torustikeks. Survetorustikud võivad moodustada harg- ja ringvõrgu.


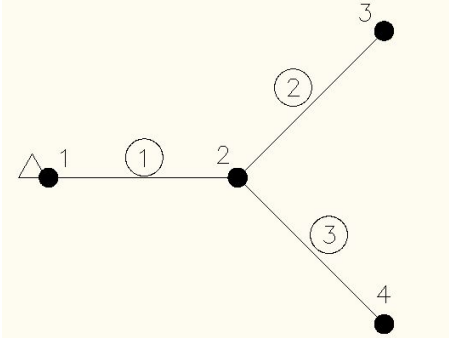
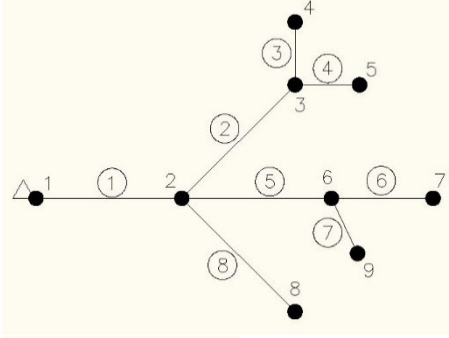
Arvutusseosed erinevatele survetorustikele:

<p>Transiittorustik, eelsurvega:</p> $h_0 + z_0 - z_L = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 gD^5}$	
<p>Transiittorustik, pumplaga:</p> $h_0 = H + z_L - z_0 + \left(k_f + \frac{f \cdot L}{D}\right) \frac{8Q^2}{\pi^2 gD^4}$ <p>kus: <math>k_f</math> – kohtsurvekaod</p>	
<p>Transiittorustik, eelsurvega, muutuva vooluhulgaga:</p> $h_j = h_0 + z_0 - z_i - \frac{8}{\pi^2 g} \sum_{p=1}^j \left( \frac{f_p L_p}{D_p} + k_{fp} \right) \frac{Q_p^2}{D_p^4}$ <p>kus: <math>p</math> – toru lõigu number; <math>h_0</math> – vabarõhk sisendpunktis; ja</p> $Q_j = \sum_{p=0}^j q_{n-p}$	
<p>Transiittorustik, pumplaga, muutuva vooluhulgaga:</p> $h_j = h_0 + z_0 - z_i - \frac{8}{\pi^2 g} \sum_{p=1}^j \left( \frac{f_p L_p}{D_p} + k_{fp} \right) \frac{Q_p^2}{D_p^4}$ <p>kus: <math>p</math> – toru lõigu number; <math>h_0</math> – pumba tõstekõrgus; ja</p> $Q_j = \sum_{p=0}^j q_{n-p}$	

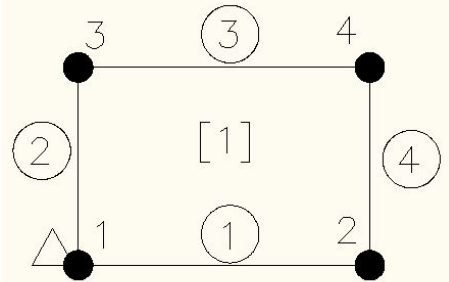
## Veevõrkude geometria

Veevõrgud omavad enamasti järgmisi kolme tüüpi konfiguratsioone: (a) hargvõrgud; (b) ringvõrgud; ning (c) harg- ja ringvõrgud.

Hargvõrgu osas saame rääkida sõlmede ( $j$ ), torude ( $i$ ) arvust.

	$i_L = 1$ $j_L = 2$ $k_L = 0$
	$i_L = 3$ $j_L = 4$ $k_L = 0$
 <div style="margin-top: 10px;"> <p>● Sõlme nr</p> <p>○ Toru nr</p> <p>[1] Ringi nr</p> <p>△ Sisendpunkt</p> </div>	$i_L = 8$ $j_L = 9$ $k_L = 0$

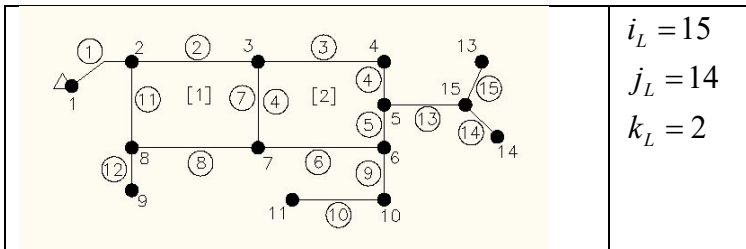
Ringvõrgu juures aga lisaks ka ringistuste arvust ( $k$ ).

	$i_L = 4$ $j_L = 4$ $k_L = 1$
---	-------------------------------------

Harg- ja ringvõrgu juures kehtib seos:

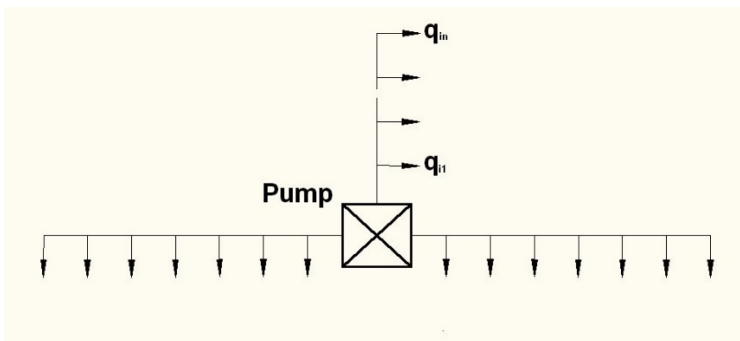
$$[ \text{Torude arv} ] = [ \text{Sõlmede arv} ] + [ \text{Ringide arv} ] - 1$$

$$i_L = j_L + k_L - 1$$

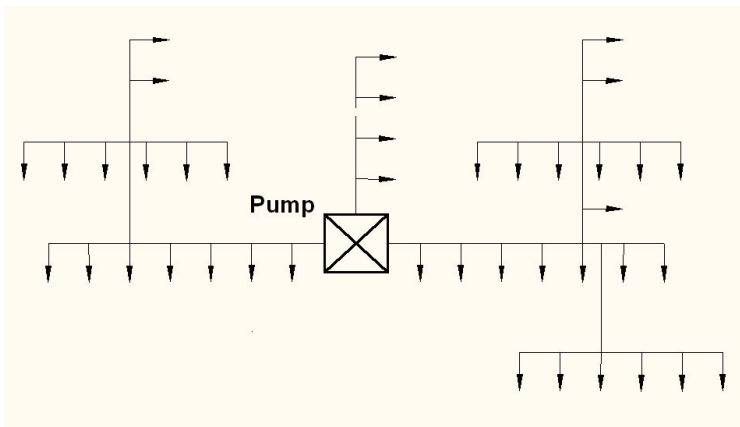


### Hargvõrgu arvutamine

Hargvõrgud on võrgud, mis ei oma ringistusi. Sellised võrgud on enamjaolt kasutatavad maapiirkondades. Lihtsaim hargvõrk on radiaalse kujuga (sisendpunktist hargnevad mitu toru erisuundadesse).

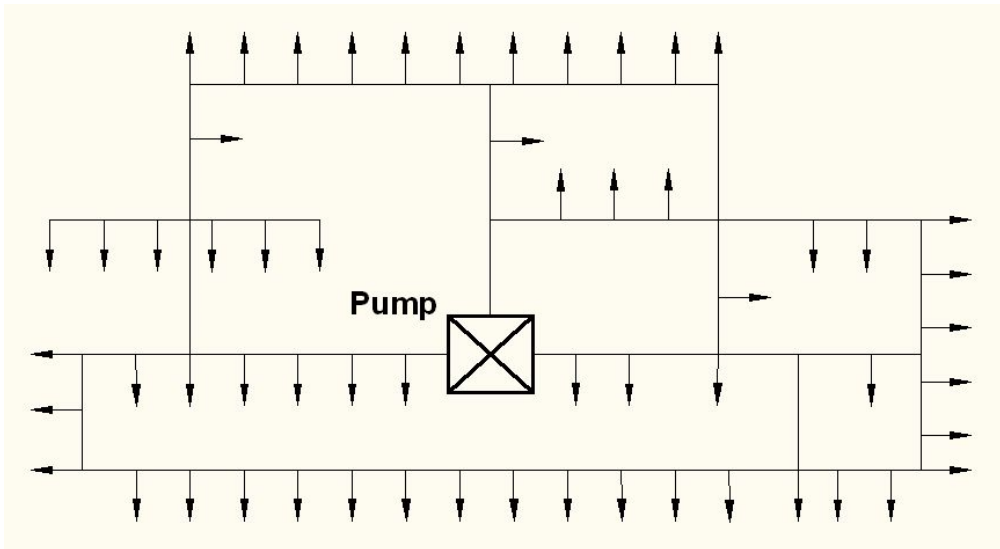


Tüüpilises hargvõrgus saadakse toru vooluhulgad sõlmede vooluhulkade summeerimisel liikudes haru otspunktist sisendpunkti poole kuniks kõik otspunktid on arvesse võetud. Seevastu sõlmede surved leitakse sisendpunktist lähtudes ning maha arvestades survekadusid.



### Ringvõrgu arvutamine

Ringvõrk on võrk, milles on üks või rohkem ringistust. Ringvõrgu eelis hargvõrgu ees on usaldatavuse küsimus (kui üks või rohkem toru on parandusteks suletud, siis võib vesi endiselt jõuda tarbijani).



Muutuva tarbimisgraafikuga ei muutu ringvõrgus mitte ainult vooluhulk aga ka voolusuund mitmes lõikudes. Seega suurtes ringvõrkudes toimub voolusuundade pidev muutumine. Ringvõrgu arvutamisel leitakse toru vooluhulgad ning surved sõlmedes. *Kirchhoff*'i reeglid rakenduvad ka veevõrkudele: (a) sõlme sisenevate ning sealt väljuvate vooluhulkade algebraline summa peab olema null; ning (b) algebraline rõhukadude summa ümber ringi peab võrduma nulliga. Kuna tegemist on mittelineaarsete võrranditega, ei saa võrku arvutada analüütiliselt. Mitmeid arvutiprogramme saab kasutada võrgu arvutamiseks, mis muuhulgas võivad kaasata mitut sisendpunkti (nt pumbajaamad ja reservuaarid). Enamkasutatavad analüüsi meetodid ringvõrgu arvutamiseks on: (1) *Hardy-Cross*, (2) *Newton-Raphson*, (3) *linearsel teoorial põhinev*.

### Hardy-Cross meetod

*Hardy-Cross* (1885-1959) - professor, *University of Illinois*, meetod publitseeritud 1936. Põhineb järgmistel pidevuse tingimustel:

(1) Sõlme sisenevate ja sealt väljuvate vooluhulkade summa on 0:

$$\sum Q_i = q_j ,$$

kus: kõikide sõlmede osas  $j = 1, 2, 3, \dots, j_L$ ;  $Q_i$  – vooluhulk torus  $i$ , mis suubub sõlme  $j$ ;  $q_j$  – sõlme  $j$  vooluhulk.

(2) Algebraline rõhukadude summa ringis võrdub 0-ga:

$$\sum_{ring\ k} K_i Q_i |Q_i| = 0$$

$$K_i = \frac{8 f_i L_i}{\pi^2 g D_i^5} ,$$

kus: kõikide ringide osas  $k = 1, 2, 3, \dots, k_L$ ;  $i$ -toru lõigu number, mida summeeritakse ringis  $k$ .

Seost edasi arendades:

Toru vooluhulgale lisatakse korrigeerimine  $\Delta Q_k$  :

$$\sum_{ring\ k} K_i (Q_i + \Delta Q_k) |Q_i + \Delta Q_k| = 0$$

Avades sulud ning jättes arvestamata liikme  $\Delta Q_k^2$  saame:

$$\Delta Q_k = \frac{\sum_{ring\ k} K_i Q_i |Q_i|}{2 \sum_{ring\ k} K_i |Q_i|}$$

Teades parandustegurit, saame seda rakendada järgmiselt:

$$Q_{i,uus} = Q_{i,vana} + \Delta Q_k,$$

kõikide k korral.

### Hardy-Cross meetod – põhisammud

- (1) Nummerda kõik sõlmed ning toru lõigud. Samuti ka ringid. Tähistage neid graafiliselt mõneti erinevalt (nt toru numbrile tee ring ümber).
- (2) Vali märgireegel. Nt toru vooluhulk on positiivne, kui see voolab madalamalt sõlme numbrilt > kõrgemale sõlme numbrile, teistel juhtudel on vooluhulk negatiivne.
- (3) Rakenda sõlme pidevuse võrrandit kõikides sõlmedes, et leida toru vooluhulgad. Alustades sõlmest, millel on kaks toru, teadmata vooluhulkadega. Eelda juhuslikku vooluhulka (nt  $0.1\ m^3/s$ ) ühes torus ning rakenda pidevuse tingimust, et saada vooluhulk teises torus. Korda sama protseduuri kuniks kõikide torude vooluhulgad on märgitud juhul kui teadmata vooluhulk on kahest enamas torus, eelda juhuslikud vooluhulgad kõikides torudes välja arvatud ühes ning rakenda pidevustingimust, et leida ülejäänud vooluhulgad. Torude arv, mis saavad omada juhuslikke vooluhulki, on võrdne võrgu peamiste ringide koguarvuga.
- (4) Eelda hõõrdetegurid ( $D-W$ )  $f_i = 0.02$  kõikides torudes ning arvuta eelnevalt toodud valemi järgi  $K_i$
- (5) Arvestades ringis oleva toru vooluhulga märki, rakenda parandustegurid, päripäeva vooluhulgad positiivsed ning vastupäeva olevad vooluhulgad negatiivsed.
- (6) Arvuta  $\Delta Q_k$  olemasolevatele toru vooluhulkadele ning rakenda toru parandused.
- (7) Rakenda sarnast protseduuri võrgu kõikide ringide osas.

Korda samme (6) ja (7), kuniks vooluhulga parandused kõikides ringides on suhtarvuna väikesed.

### Newton-Raphson meetod

Kogu võrku analüüsitakse ühe tervikuna (mitte ringi kaupa nagu  $H-C$  meetodi juures). Tegemist on väga võimeka numbrilise meetodiga, mis võimaldab lahendada mittelinearseid võrrandisüsteeme.

Oletame, et meil on 3 mittelineaarset võrrandit:

$$F_1(Q_1, Q_2, Q_3) = 0$$

$$F_2(Q_1, Q_2, Q_3) = 0$$

$$F_3(Q_1, Q_2, Q_3) = 0$$

Neid lahendatakse, et saada  $Q_1, Q_2, Q_3$ . Esmalt tuleb valida lähtelahend ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ). Seejärel eeldame, et võrrandite grupp: ( $Q_1 + \Delta Q_1, Q_2 + \Delta Q_2, Q_3 + \Delta Q_3$ ) on samuti lahendiks. Seega:

$$F_1(Q_1 + \Delta Q_1, Q_2 + \Delta Q_2, Q_3 + \Delta Q_3) = 0$$

$$F_2(Q_1 + \Delta Q_1, Q_2 + \Delta Q_2, Q_3 + \Delta Q_3) = 0$$

$$F_3(Q_1 + \Delta Q_1, Q_2 + \Delta Q_2, Q_3 + \Delta Q_3) = 0$$

Arendades need Taylor'i ritta:

$$\begin{aligned}
 F_1 + [\partial F_1 / \partial Q_1] \Delta Q_1 + [\partial F_1 / \partial Q_2] \Delta Q_2 + [\partial F_1 / \partial Q_3] \Delta Q_3 &= 0 \\
 F_2 + [\partial F_2 / \partial Q_1] \Delta Q_1 + [\partial F_2 / \partial Q_2] \Delta Q_2 + [\partial F_2 / \partial Q_3] \Delta Q_3 &= 0 \\
 F_3 + [\partial F_3 / \partial Q_1] \Delta Q_1 + [\partial F_3 / \partial Q_2] \Delta Q_2 + [\partial F_3 / \partial Q_3] \Delta Q_3 &= 0
 \end{aligned}$$

Kirjutades eelnevalt toodud võrdused üle maatriks-kujule:

$$\begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial Q_1 & \partial F_1 / \partial Q_2 & \partial F_1 / \partial Q_3 \\ \partial F_2 / \partial Q_1 & \partial F_2 / \partial Q_2 & \partial F_2 / \partial Q_3 \\ \partial F_3 / \partial Q_1 & \partial F_3 / \partial Q_2 & \partial F_3 / \partial Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

Ning lahendades selle:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial Q_1 & \partial F_1 / \partial Q_2 & \partial F_1 / \partial Q_3 \\ \partial F_2 / \partial Q_1 & \partial F_2 / \partial Q_2 & \partial F_2 / \partial Q_3 \\ \partial F_3 / \partial Q_1 & \partial F_3 / \partial Q_2 & \partial F_3 / \partial Q_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

Teades parandustegureid, saame uued vooluhulgad:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$$

Siit on võimalik näha, et suurte võrkude korral on ajakulukas iga kord maatriksit uuesti ümber pöörata. Seetõttu kasutatakse juba kord ümber pööratud maatriksit vähemalt kolm korda, et parandustegureid saada.

### Newton-Rapshon meetod – põhisammud

- (1) Nummerda kõik sõlmed, torud ning ringid.
- (2) Kirjuta sõlmede vooluhulkade võrrandid kui:

$$F_j = \sum_{n=1}^{j_n} Q_{jn} - q_j = 0,$$

kus: kõikide sõlmede osas – 1;  $Q_{jn}$  – vooluhulk  $n$ -ndas torus, sõlmes  $j$ ;  $q_j$  – sõlme vooluhulgad;  $j_n$  – sõlmes  $j$  olevate torude koguarv.

- (3) Kirjuta ringi survekadude võrrandid kui:

$$F_k = \sum_{n=1}^{k_n} K_n Q_{kn} |Q_{kn}| = 0,$$

kus: kõikide ringide osas ( $n = 1, k_n$ );  $K_n$  – ringis  $k$  olevate torude koguarv.

- (4) Eelda algsed vooluhulgad:  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$ , mis rahuldavad pidevustingimusi
- (5) Eelda hõõrdetegurid;  $f_i = 0.02$  kõikides toru lõikudes ning arvuta vastavad  $K_i$  väärtused.
- (6) Leia osatuletised  $\partial F_n / \partial Q_n$  funktsiooni  $F_n$  väärtused läbi algsete toru vooluhulkade  $Q_i$  ning  $K_i$ .
- (7) Leia  $\Delta Q_i$ . Leitavad võrdused omavad kuju  $Ax = b$ , mida saab lahendada  $\Delta Q_i$  osas.
- (8) Kasutades leitud  $\Delta Q_i$  väärtuseid, toru vooluhulgad muudetakse ning protsessi korratakse kuniks arvutatud  $\Delta Q_i$  väärtused on väga väikesed.



## Lineaarse teooria meetod

Selle meetodi juures lineariseeritakse energeetikat (rõhukadusid) esitavad võrdused kujule:

$$F_k = \sum_{n=1}^{k_n} b_{kn} Q_{kn} = 0,$$
$$b_{kn} = K_n |Q_{kn}|$$

kus:  $b_{kn}$  - algselt teadaolevad vooluhulgad

Väärtust  $b_{kn}$  parandatakse hetke toru vooluhulkadega uue iteratsiooni eel. Seega saame kokku lineaarsed võrrandid, mida saab standardsete meetoditega lahendada. Seega võrrandite arv kujuneb järgmiselt ( $i_L$  teadmata vooluhulga leidmiseks):

Sõlmede pidevuse võrrandid:  $n_L - 1$  sõlme tarvis

Ringi survekadude arvestamise võrrandid ( $k_L$  ringi tarvis).

### Lineaarse teooria meetod – põhisammud

- (1) Nummerda kõik sõlmed, torud ning ringid.
- (2) Kirjuta sõlmede voolhulkade võrrandid kui:

$$F_j = \sum_{n=1}^{j_n} Q_{jn} - q_j = 0,$$

kus:  $kõikide sõlmede osas - 1$ ;  $Q_{jn}$  – vooluhulk  $n$ -ndas torus, sõlmes  $j$ ;  $q_j$  – sõlme vooluhulgad;  $j_n$  – sõlmes  $j$  olevate torude koguarv.

- (3) Kirjuta ringi survekadude võrrandid kui:

$$F_k = \sum_{n=1}^{k_n} b_{kn} Q_{kn} = 0,$$

kus:  $kõikide ringide osas (n = 1, k_n)$ .

- (4) Eelda algsed vooluhulgad:  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ , mis rahuldavad pidevustingimusi
- (5) Eelda hõõrdetegurid;  $f_i = 0.02$  kõikides toru lõikudes ning arvuta vastavad  $K_i$  väärtused.
- (6) Üldista sõlmede pidevused ning ringide võrdused kogu võrgus
- (7) Leia torude vooluhulgad. Saada võrrand omab kuju  $Ax = b$ , mida saab lahendada  $Q_i$  leidmiseks.
- (8) Arvuta koefitsiendid  $b_{kn}$  uuesti, leitud  $Q_i$  väärtustest.
- (9) Korda protsessi uuesti kuniks  $Q_i$  väärtused kahel järjestikusel iteratsioonil on piisavalt lähedal eeldefineeritud piiridele.

## Veekvaliteedi modelleerimine

Veekvaliteedi analüüs (VM) kasutab hüdraulilist mudelit (HM) (EPS) mudelit lähtepunktina, sest teades vooluhulka torus ning kulgu, on võimalik määrata segunemist, resideerimisaega ning teisi hüdraulilisi karakteristikuid, mis mõjutavad desinfektsioonivahendi transporti ning lagunemist. Võrrandite lähteallikas: Grayman, Rossman, Geldreich (2000).

### Transport torudes

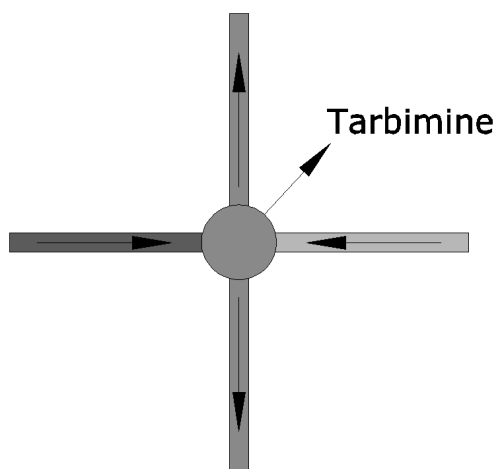
$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{Q_i}{A_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \theta(C_i), i = 1 \dots P,$$

kus:  $C_i$  – kontsentratsioon torus  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $Q_i$  – vooluhulk torus  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A_i$  – toru ristlõike pindala ( $\text{m}^2$ );  $\theta(C_i)$  – reageerimise aeg ( $\text{kg} / \text{m}^3\text{s}$ ).

### Segunemine sõlmedes

$$\left( C_{OUT_j} = \frac{\sum_{i \in IN_j} Q_i C_{i,ni} + U_j}{\sum_{i \in OUT_j} Q_i} \right),$$

kus:  $C_{OUT_j}$  – kontsentratsioon, mis eemaldub sõlmes  $j$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $OUT_j$  – torude grupp, mis eemalduvad sõlmes  $j$ ;  $IN_j$  – torude grupp, mis sisenevad sõlme  $j$ ;  $Q_i$  – vooluhulk, mis siseneb sõlme torust  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $C_{i,ni}$  – kontsentratsioon, mis siseneb sõlme torust  $i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $U_j$  – kontsentratsiooni allikas sõlmes  $j$  ( $\text{kg}/\text{s}$ ).



### Segunemine mahutites

$$\frac{dC_k}{dt} = \frac{Q_i}{V_k} (C_{i,np}(t) - C_k) + \theta(C_k),$$

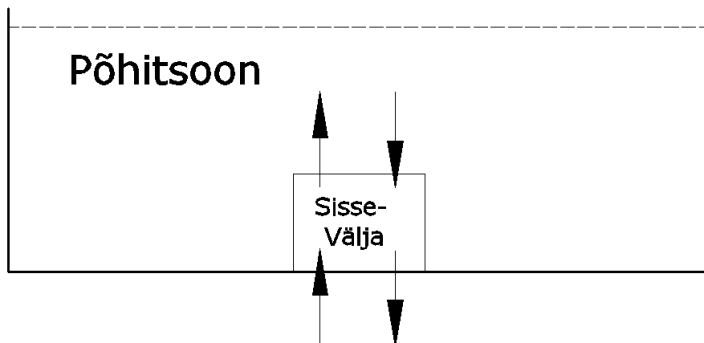
kus:  $C_k$  – kontsentratsioon mahutis või reservuaaris  $k$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $Q_i$  – vooluhulk, mis siseneb mahutisse / reservuaari torust  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $V_k$  – ruumala mahutis või reservuaaris  $k$  ( $\text{m}^3$ );  $\theta(C_k)$  – reageerimise aeg ( $\text{kg} / \text{m}^3\text{s}$ ).

$$\frac{dC_k}{dt} = \theta(C_k),$$

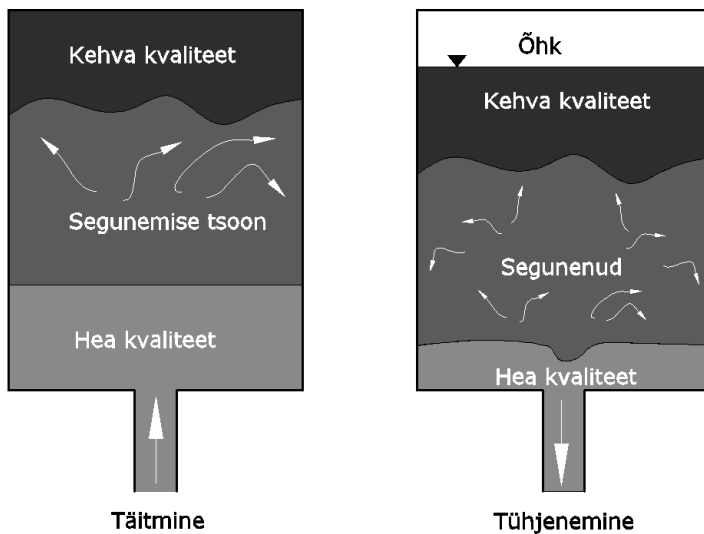
kus:  $C_k$  – kontsentratsioon mahutis või reservuaaris  $k$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\theta(C_k)$  – reageerimise aeg ( $\text{kg} / \text{m}^3\text{s}$ )

Mõlemad eelnevalt kirjeldatud võrdused eeldavad, et kontsentratsioonid mahutis/reservuaaris segunevad täielikult ning koheselt. Sellist lähenemisviisi kasutatakse tihtipeale ka veevõrgu kvaliteedi mudelites. Eksisteerib ka teisi segunemise mudelite tüüpe (Grayman et al., 1996). Eksisteerivad järgmised segunemise mudelid:

- *FIFO (first in first out) mudel* – kontaktil põhinevate desinfektorite kasutamiseks.
- *LIFO (last in first out)* – kui segunemine mahutis on harva esinev, võib kasutada mudelit, milles esimene maht, mis mahutisse siseneb (täitumisel), on viimane, mis tühjenemisel lahkub.
- Sahtlitel (seksioonidel) põhinevad mudelid – võimaldavad segunemise protsesse ning viivitusi esitada täpsemini.



Joonis. Kahe sahtli mudel.



Joonis. Kolme sahtli mudel.

### Keemiline reaktsioon

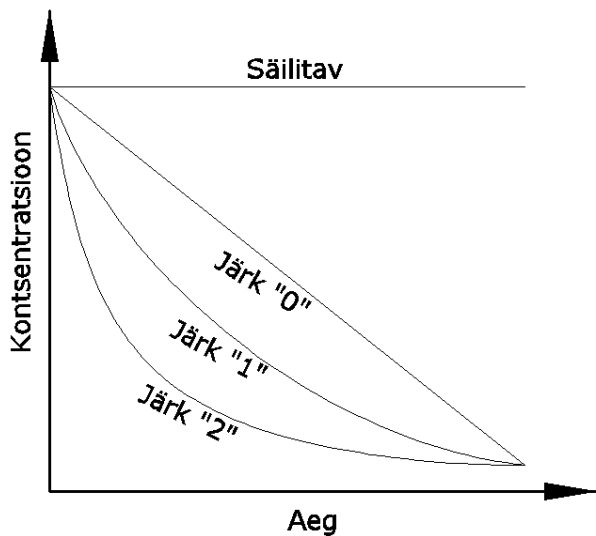
Peale vee lahkumist veepuhastusjaamast kaasneb sellega mitmeid keerukaid füüsikalisi ning keemilisi protsesse. Kolm olulisemat, mida modelleeritakse on: (a) vedeliku massi reaktsioon; (b) pindadel (nt toru seinal) toimuv reaktsioon; (c) moodustumise reaktsioon, mis kaasab piiratud koguse reageerivat ainet.

Keemiline reaktsioon vedeliku massis toimub vedeliku mahu siseselt ning on funktsioon aine kontsentratsioonidest, reageerimiseajast ning astmest ning loodavatest kontsentratsiooni tulemitest:

$$\theta(C_k) = \pm kC^n,$$

kus:  $\theta(C_k)$  – reageerimise tingimus ( $\text{kg} / \text{m}^3\text{s}$ );  $k$  – reageerimise kiiruse koefitsient [ $(\text{m}^3/\text{kg})^{n-1} / \text{s}$ ];  $C$  – kontsentratsioon ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $n$  – reageerimise astme järju konstant.

Lähtuvalt reageerimise astme järgust saame esitada kontsentratsioonide muutuse ajas järgmiste kõveratega:



Kasutatavaim on 1. järku lagunemise mudel (kloori, radooni aga ka teistele lagunemise protsessidele):

$$C_t = C_0 e^{-kt}$$

kus:  $C_t$  – kontsentratsioon ajahetkel  $t$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_0$  – algne kontsentratsioon (ajahetkel null);  $k$  – reageerimise kiirus ( $1/\text{s}$ ).

Keemilise reaktsiooni juures räägime ka pooldumise ajast:

$$T = -\frac{0.693}{k}$$

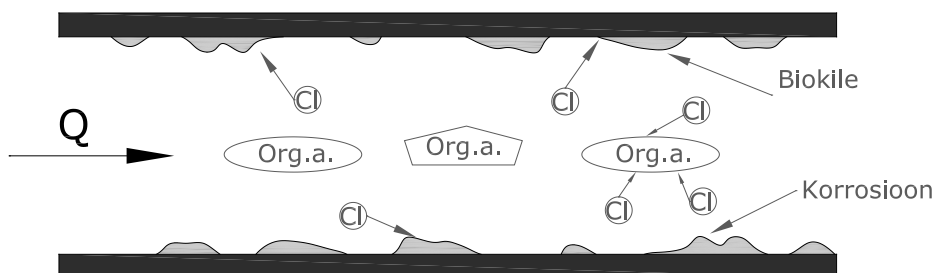
$$C/C_0 = 0.5$$

Keemiline reaktsioon toru seinal kasutab esimest järku lagunemise mudelit, mille on välja töötanud *Rossmann, Clark & Grayman (1994)*. See on matemaatiline mudel, mis arvestab muuhulgas ka desinfektori transporti vedelikust toru seinale (massi transport) ning seal toimuvaid keemilisi reaktsioone:

$$\theta(C) = \pm KC,$$

kus:  $K$  - kogu reageerimise kiiruse konstant ( $1/\text{s}$ )

Seega on tegemist funktsiooniga nii vedeliku massi kui seinaga reageerimise koefitsientidest.



$$K = k_b + \frac{k_w k_f}{R_H (k_w + k_f)},$$

kus:  $k_b$  – vedeliku massi reageerimise koefitsient (1/s);  $k_w$  – sein reageerimisekoefitsient (1/s);  $k_f$  – massi ülekande koefitsient (massist toru seinale) (m/s);  $R_H$  – torustiku hüdrauliline raadius (m).

Desinfektori hajumine toru seinal sõltub, kui kiiresti see transporditakse toru seinani ning ka kiirusest, millega ta seal seejärel reageerib. Massi ülekande tegurit kasutataksegi kiiruse määramiseks toru seinale.

$$k_f = \frac{S_H d}{D},$$

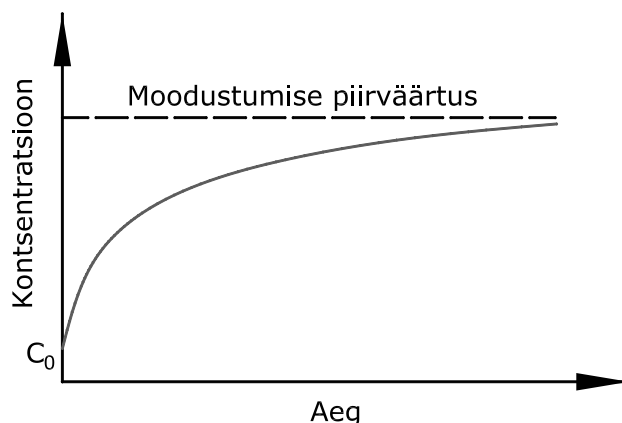
kus:  $S_H$  – Sherwood arv (arvutusvalem sõltub  $Re$  arvust);  $d$  – aine molekulaarne difusioon vedeliku massis ( $m^2/s$ );  $D$  – toru läbimõõt (m).

Kui vedeliku massis toimuva hajuvuse konstanti on võimalik määrata eksperimentaalselt, siis seinal toimuvaid hajuvusi on oluliselt raskem mõõta ning neid tavaliselt hinnatakse desinfektori kontsentratsioonide mõõtmistest võrgus ning vee kvaliteedi simulatsioonide tulemustest.

Keemilise reaktsiooni kui moodustumise reaktsioonina võib tekkida mõni teine aine. Näiteks kloori sisaldavas vees toimub reaktsioon kloori ning orgaanilise materjali vahel, mille tulemusena võib tekkida mõni teine aine (*trihalomethane*). Esimest järku reaktsiooni mudel arvestab vaid ühe aine kontsentratsiooni. Kuniks vaid ühte ainet ka arvestatakse, sellest piisab. On välja töötatud ka mudeleid, kus esimest järku reaktsiooni kasvu kiirus töötab teatud piirväärtuseni – nt esitamaks *trihalomethane* (*DBP - disinfection by product*) teket.

$$THM(t) = C_0 + [FP - S_0] [1 - e^{-kt}],$$

kus:  $THM(t)$  – THM kontsentratsioon ajahetkel  $t$ ;  $C_0$  – algne THM kontsentratsioon;  $FP$  – tekke võimalikkus (kontsentratsioon);  $k$  – reageerimise kiirus (positiivne väärtus).



### Veekvaliteedi simulatsiooni teised tüübid

Lisaks aine (*constituent*) leviku analüüsile võib teostada: (a) lähtepunkti järgimist (*source trace*); (b) veevanuse analüüsi (*water age*).

Lähtepunkti järgimist kasutatakse kahe ja enama veevõrgu sisendpunkti korral, et teada saada lähtepunktidest antava vee jaotus võrgus. Segunemine sõltub veekvaliteedi näitajatest (põhjavesi ning pinnavesi). Mõningatele juhtudel võib segunemine vähendada vee kvaliteedi esteetilisi näitajaid (nt

ainete sadestumisel tekkiv hägusus; lõhna ning maitse probleemide tekkeallikas) – võib põhjustada desinfektsioonivahendi jääkide haldamise probleeme. Lähtepunkti järgimist Kasutatakse ka mahutitest lähtuva vee uurimiseks võrgus. Modelleerimispakettides annab vastav analüüs protsendi väärtuse igale võrgu elemendile kindlast allikast pärinevad vee kohta – selleks kasutatakse eelnevalt toodud valemeid, kus arvestatakse, et lähtekontsentratsioon on 100 ühikut – aine transpordist tingitud ajanihked ning lahjenemised mõjutavad aine kontsentratsiooni.

Vee kumulatiivne seismise aeg süsteemis (vee vanus) on üks lihtsamini läbiviidavaid veekvaliteedi analüüse, kuna peale kalibreeritud hüdraulilise mudeli pole vaja eraldi läbi viia vee kvaliteediga seotud kalibreerimisi. See on üks olulisi näitajaid, kui soovitakse teada saada mahutite toimet veekvaliteedile. Lisaks saab selle abil määrata ka desinfektori jääkide kadumist ning ainete omavahelise kombineerumise tagajärjel tekkivaid desinfektorite vorme. Tegemist pole siiski nii täpse arvutusega, kui seda pakub aine leviku analüüs! Võrduste näol on tegemist aine leviku analüüsi erijuhtumiga, kus siseneva vee vanus võrku on 0. Seega eeldatakse 0-järku reageerimist, kus:

$$k = +1 \left( \frac{mg}{l \cdot s} \right)$$

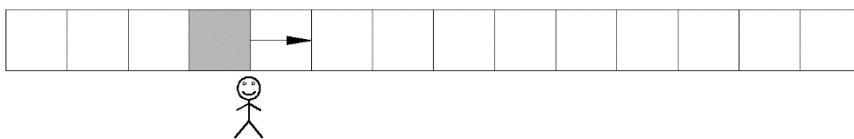
Sellest lähtuvalt on tegemist aine kontsentratsiooni kasvuga, mis on otseselt võrdeline ajaga – mis omakorda kumulatiivselt summeeritakse liikumisraja sihis.

### Veekvaliteedi modelleerimise lahendusmeetodid

Esimesed veekvaliteedi mudelid olid statsionaarse voolamise analüüsi mudelid. Veevõrgus toimuvate ajutiste muutuste (nt veekvaliteedi parameetrites, kontsentratsioonid) kaasamiseks ei piisa statsionaarsetest mudelitest. Dünaamilised veekvaliteedimudelid ilmusid 1980ndatel aastatel. Dünaamiliste veekvaliteedi võrrandite lahendamiseks kasutatakse kahte meetodit: (1) *Euleri'* lähenemisviis – jagab iga üksiku toru võrdsete pikkustega alam-lõikude jadaks; (2) *Lagrange'i* lähenemisviis – järgib veeosakeste ühtlast, veekvaliteedilist lähtuvat kontsentratsiooni, kui need liiguvad läbi torusüsteemide. Mõlema lahendusmeetodi eelduseks on hüdrauliline *EPS* mudel (määrab *Q*, voolusuuna ja kiiruse igas torus kõikidel ajahetkedel).

#### *Euleri lähenemisviis*

Iga ajahetke tarvis jagatakse toru segmentideks. Aeg, mis kulub ühe segmenti läbimiseks = kasutaja poolt määratud veekvaliteedi ajasammuga (see on konstant kogu simulatsiooni vältel). Tingimuse tagamiseks on iga toru segmenti pikkus erinev. Reageerivate ainete korral korrigeeritakse veekvaliteeti vastava reaktsiooni meetodiga igal veekvaliteedi ajasammul.

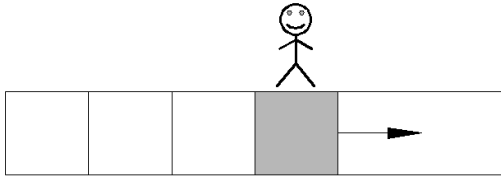


Vaatleja seisab paigal – vesi liigub temast mööda. Sõlmedes, kus liituvad mitu toru – arvutatakse kontsentratsioonid vooluhulkade keskmestamise läbi (vaata *segunemine sõlmedes*). Pumbad ja klapid ei mõjuta veekvaliteeti – vesi liigub neist otse läbi. Kui hüdraulilise arvutuse ajasammul on muutunud vooluhulk või suund, teostatakse vastav muudatus alamlõigu võrgustikus – ning veekvaliteedi kontsentratsioonid eelmisest sammust saavad iga uue alamlõigu veekvaliteedi lähtetingimusteks. Eraldi käsitletakse probleemseid kohti, kus torud on väga lühikesed (nõuaks väiksemat ajasammu kui veekvaliteedi ajasamm) või väga pikad (kus alamlõikude arv on liialt suur).

#### *Lagrange' lähenemisviis*

Fikseeritud võrgustiku asemel järgitakse ühetaolise kontsentratsiooniga vee osakesi. Uusi osakesi lisatakse siis, kui on muutunud vee kvaliteet (nt lähtepunkti kvaliteedi muutus või osakeste

kombineerumine sõlmedes). Osakeste arvu vähendamiseks on loodud algoritmid, mis kombineerivad omavahel kõrvuti asetsevaid osakesi, kui nende kontsentratsioonide erinevused on väiksemad, kui kasutaja poolt määratud tolerantsid.



Vaatleja liigub vooluga kaasa. Eristatakse kahte tüüpi lahendit – *time-driven* (ajast sõltuv) ning *event driven* (sündmusest sõltuv). *Time-driven* – Tingimusi uuendatakse kindla ajasammu tagant. *Event-driven* – Tingimusi uuendatakse, kui lähtepunkti veekvaliteet muutub või osakese jõudmisel sõlmeni. *Rossmann ja Boulos (1996)* on leidnud, et *Lagrange'* ajast sõltuv meetod on kõige efektiivsem ning usaldusväärsem lahendusmeetod veevõrgu kvaliteedi mudelite juures.

## Referentsid

### *Pildimaterjal*

- Ref #14 [http://blogs.oc.edu/ee/images/uploads/ece/Computer\\_Engineer\\_gif\\_thumb.jpg](http://blogs.oc.edu/ee/images/uploads/ece/Computer_Engineer_gif_thumb.jpg)
- Ref #15 Duk, Laminar shear, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Laminar\\_shear.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Laminar_shear.svg)
- Ref #16 Viscous regimes chart, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Viscous\\_regimes\\_chart.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Viscous_regimes_chart.png)
- Ref #17 Moody diagram, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moody\\_diagram.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moody_diagram.jpg)
- Ref #18 Valve cross-section, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Valve\\_cross-section.PNG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Valve_cross-section.PNG)

### *Artiklid*

Grayman, W. M., Rossman, L. A., and Geldreich, E. E. (2000). "Water Quality." *Water Distribution Systems Handbook*, Mays, L. W., ed., McGraw-Hill, New York, New York.

Grayman, W. M., Deininger, R. A., Green, A., Boulos, P. F., Bowcock, R. W., and Godwin, C. C. (1996). "Water Quality and Mixing Models for Tanks and Reservoirs." *Journal of the American Water Works Association*, 88(7).

Lamont, P. A. (1981). "Common Pipe Flow Formulas Compared with the Theory of Roughness." *Journal of the American Water Works Association*, 73(5), 274.

Rossman, L. A., Clark, R. M., and Grayman, W. M. (1994). "Modeling Chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems." *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 121(4), 803.

Rossman, L. A., and Boulos, P. F. (1996). "Numerical Methods for Modeling Water Quality in Distribution Systems: A Comparison." *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 122(2), 137.

Swamee, P. K., and Jain, A. K. (1976). "Explicit Equations for Pipe Flow Problems." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 102(5), 657.



# Tarbimine

## Sissejuhatus

Vee tarbimine või kasutamine on veevõrgusüsteemides oleva hüdraulilise dünaamika tekke tingimus. Põhiküsimused, mis puudutavad vee tarbimist, kui koostatakse hüdraulilist mudelit:

- Kui palju vett tarbitakse?
- Kus asuvad tarbimispunktid?
- Kuidas muutub tarbimine ajas?

## Põhimõisted

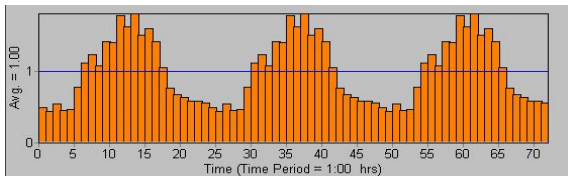
- Kliendi tarbimine – igapäevane tarbimisnorm (üldjuhul saadud läbi veemõõtjate).
- Registreerimata tarbimine – teatud % (või kogus) tarbimisest, mis kaotatakse võrgu opereerimisel (nt lekked, illegaalsed ühendused, mõõtmata tarbimine jms).
- Tulekustutusvesi – arvatatud süsteemi nõue tagamaks piisav kaitse tulekahjude likvideerimiseks.

Tarbimiste määratlemine on üldjuhul töökulukas protsess, kuna: (a) andmeid talletatakse kujul, mida ei saa mudelitesse otse sisse viia (kliendi põhised andmebaasid, keskmised või hooajalised tarbimisandmed arvete põhjal); (b) mõõdetud andmeid ei talletata tarbimissõlme põhiselt; (c) andmete töötlus ning tarbimiste määratlemine eeldab tarbimiskäitumiste hindamist ajalooliselt, hetkel ning tulevikus.

Peale tarbimiste kindlaks määramist jaotatakse need üle võrgu sõlmede laiali kui koormused. Koormuste määratlus hõlmab endas keskmise päeva tarbimiste sisestamist sõlmedesse, tiptunni koefitsientide määratlemist statsionaarsetele mudelitele või tarbimisgraafikute sisestamist EPS mudelitele, tulekustutusvee vooluhulkade ning teiste eritüüpsete tarbimiste määratlemist ning tarbimiste ennustamist tulevikuks (hüdraulilise süsteemi planeerimise ning disaini küsimus).

## Baastarbimine

Üldjuhul on tarbimiste hindamisel esimeseks etapiks baastarbimise määratlemine. See leitakse kui päeva keskmine tarbimine kindlal aastal. Baastarbimine sisaldab endas ka registreerimata vett.



Tarbimisgraafik (EPANET tarkvaras)

Property	Value
*Junction ID	53069
X-Coordinate	64896.55
Y-Coordinate	54146.19
Description	
Tag	
*Elevation	6.7
Base Demand	0.03100

Baastarbimine (EPANET tarkvaras)

## Andmete allikad

Andmete allikateks võivad olla:

- Olemasolev andmestik (nt olemasolevad mudelid; oht: vananenud andmed).
- Võrgu opereerimisel talletatud info (nt pumpade logid, mahutite tasemete graafikud – näitavad päevast tarbimist aga ka graafiku muutust ajas). Infot hoitakse tavaliselt järgmistel kujudel -vooluhulk pumplast/reservuaarist, tarbitud maht ning veetasapind mahutis). Üldjuhul on vaja andmestikku esmalt töödelda, et seda saaks kasutada edasistes analüüsides.
- Veemõõtjad ning arvete põhine info (perioodiliselt talletatud info – nt kuu lõikes, kvartal). Arvete põhisest andmebaasist saab edukalt kätte küll baastarbimise, kuid muutusi ajas on nende põhjal raske ennustada.
- Tarbimise põhist andmestiku sisselugemist on võimalik mitmeti automatiseerida operaatori tasandil: Kliendi ID seotakse tarbimissõlmega või GIS (geographic information system) kasutamine (kaartidelt lugemine).

## Tarbimiste jagamine

Andmestik pole üldjuhul talletatud sõlme põhiselt, seega tuleb saadavat infot töödelda ning jagada tarbimised sõlmede vahel ära. Enamkasutatavad meetodiks on nn ühiktarbimine. Ühiktarbimine määratakse sõltuvalt maakasutusest/kruntide arvust/inimeste arvust.

Näide: Arvestades inimese kohta tulevat keskmist tarbimist 100 l/päevas ning inimeste arvu sõlme piirkonnas kui 25, saame tulemuseks sõlme tarbimise 2500 l/päevas.

Ühiktarbimisi võib olla erinevat liiki:

- Üldine süsteemi kesktarbimine (SKT) arvutatav kui:

$$\text{SKT} = \text{tootmine} / \text{kodukasutajate arv}$$

- Kodukasutajate kesktarbimine (KKT) arvutatav kui:

$$\text{KKT} = (\text{toodetud} - \text{tööstuste tarbimine}) / \text{kodukasutajate arv}$$

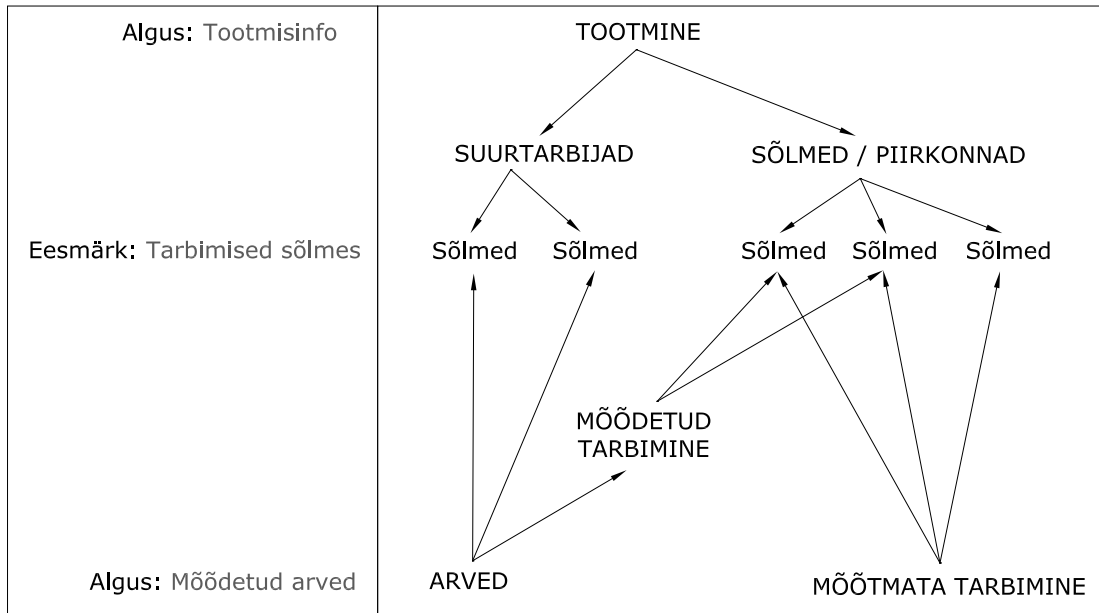
- Mõõdetud kodukasutajate kesktarbimine (mKKT) arvutatav kui (ei sisalda tööstuslikku tarbimist ega ka registreerimata tarbimist):

$$\text{mKKT} = \text{mõõdetud kesktarbimine} / \text{kodukasutajate arv}$$

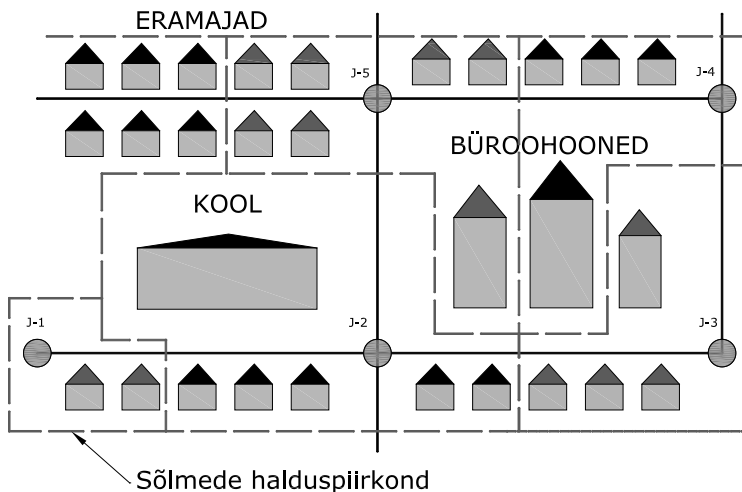
Andmestikus esineb üldjuhul puudujäake (erinevad perioodid). Arved ning tarbimise andmestikud (võrku antud vooluhulk) tuleb omavahel kokku viia. Selleks kasutatakse kahte põhilist meetodit:

- *Top-down* (nn “ülalt-alla” või “suuremast väiksemale”)
- *Bottom-up* (nn “alt-üles” või “väiksemast suuremale”)

Mõlemad meetodid põhinevad massi jäävusel. *Top-down* meetodi juures alustatakse sisendpunktist (pumpla, reservuaar), kogu toodangust võetakse maha suurtarbijad (neid mõõdetakse üldjuhul eraldi) ning ülejäänv osa jaotatakse ära ülejäänud tarbijate vahel. *Bottom-up* meetodi juures alustatakse üksikute tarbijate (kliientide) maksegraafikutest ning tarbimised liidetakse vastavalt piirkonnale kindlasse sõlme. Enamik meetodeid kaasavad mõlemat jagamise viisi – ning kindlasti sõltub see ka süsteemist, millised andmed on kättesaadavad ning vajalikust täpsusklassist, mida saavutada soovitakse. Mõningatel juhtudel võidakse otsustus teha tsoonide kaupa erinevalt.



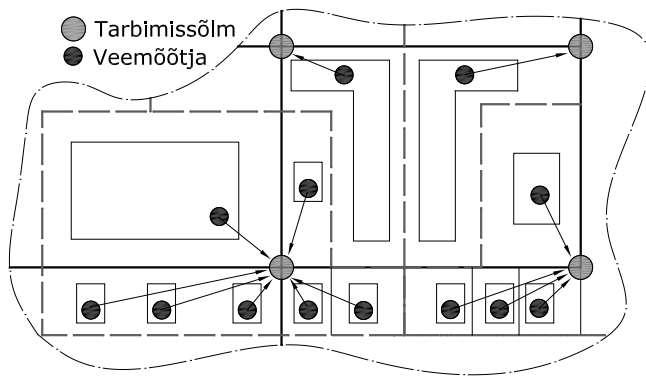
*Top-down* ja *bottom-up* meetodid võivad mõlemad kaasata vigu (nt lähtuvalt registreerimata veest ja selle määramisest sõlmedesse) ning eriti just *bottom-up* meetodi kasutamine nõuab alguses mahukat tööd (arvete ja sõlmede sidumine). Samas disainitakse süsteemid üldjuhul vajamineva tulekustusvee vooluhulgast lähtuvalt, seega ei oma tarbimiste jagamisest tingitud väikesed vead suurt tähtsust. Teiselt poolt mängivad veekvaliteedi arvutuste juures vead olulist rolli, kuna siis ei arvestata jällegi tulekustusvee vooluhulkadega. *GIS meetodi* kasutamine võimaldab automatiseerida tarbimiste jagamist sõlmedesse (nt torude diameetrist lähtuvalt tarbimispunktide valik – transiitorudele ei määrata tarbimisi aga väiksemate läbimõõduga torudele lisatakse).



Põhisamm on tarbijate määratlemine sõlmedesse. Punktiirjooned (vt eelmist joonist) on nn sõlme halduspiirkonnad – nt J-1 peaks enda alla võtma 2 kodu ning J-4 peaks enda all võtma büroohoone ja 3 kodu. Tarbimiste jagamisel peab modelleerija kindlustama sellise olukorra, et: (1) sõlmede summaarne tarbimine süsteemis tervikuna ning igas survetsoonis langeb kokku mõõdetud andmetega ning (2) tarbimiste jagamine ikkagi esitab tegelikke tarbimisi.

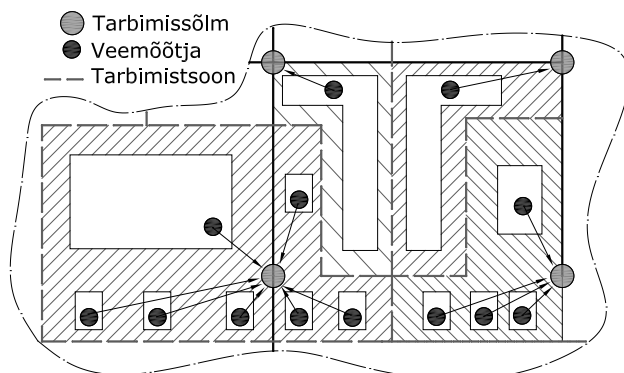
GIS-i meetodit saab tarbimiste jagamisel kasutada kui: (a) üksiku veemõõtja sidumine sõlmega; (b) veemõõtjate koondamine sõlme; (c) vooluhulga jagamine; (d) fikseeritud tarbimise sidumine ning (e) tuleviku tarbimiste projektsioon.

**Üksiku veemõõtja sidumine sõlmega.** GIS-i ruumilise analüüsi läbi määratud geograafiliste koordinaatidega veemõõtjad seotakse lähima sõlmega. Tegemist on punkt-punktiga jagamise tehnikaga, kus määravaks saab sirgjoon sõlme ja mõõtja vahel. Siin ei arvesta torustike paiknemist ning tegelikku sidumist veemõõdusõlme ja toru vahel.



Joonis. Üksiku veemõõtja sidumine sõlmega

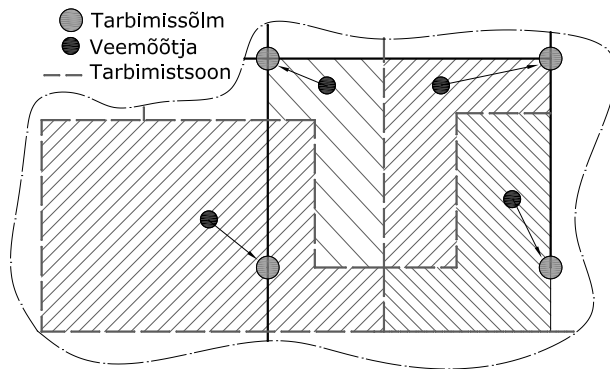
Veemõõtjate koondamine sõlme. Mingi teatud ala sees olevad veemõõtjad seotakse tarbimissõlmega. Teenuse polügon määratleb piiritletava ala, mis kaasab veemõõtjad sõlme. Tegemist on polügoni ning punkti vahelise siduse loomisega, sest teenuse ala asub GIS polügonide kihil ning tarbimissõlmed omakorda punkti kihil. Kuna siinse sammu juures tuleb luua uus kiht – polügonide kiht, siis nõuab see märksa suuremat algset panust kui *lähima punkti valik*. Automaatsed jagamised ei pruugi väga häid tulemusi anda ning seetõttu võib osutada vajalikuks käsitsi polügoni piiride jagamine.



Joonis. Veemõõtja koondamine sõlme.

Teatud summaarse vooluhulga jagamine teeninduspiirkonna polügonide vahel ning nendele loodud tarbimispunktidesse. Summaarne vooluhulk on teada, teeniduspiirkonna polügonid on ka teada, kuid üksikute tarbimispunktide vooluhulkasid pole teada. Sellist meetodit võidakse kasutada näiteks

survetsoonides, mõõdetavates piirkondades või mõne muu kriteeriumiga kooskõlas olevatel juhtudel. Eristatakse kahte meetodit, kuidas jagatakse: (a) ühtlane jaotus ning (b) proportsionaalne jaotus.



Joonis. Vooluhulga jagamine.

Ühtlane jaotus – summaarne tarbimine jagatakse polügonide arvuga antud piirkonnas ja igasse sõlme antakse seejärel vooluhulk. See meetod nõuab summaarse tarbimise ala defineerimist (või rahvastiku arvu polügoni defineerimist) ning nende polügonidega seotavaid sõlmpunkte.

Proportsionaalne jaotus – polügoni tarbimine sõltub, kas selle pindalast või rahvastiku arvust – seega mida suurem pindala või mida suurem inimeste arv polügonil, seda rohkem tarbimist antud ala summaarsest tarbimisest saab. Seega kui näiteks summaarsest tarbimise alast võtab üks polügon enda alla 50% pindalast, siis saab see polügon endale 50% tarbimisest.

Mõnel juhul kasutatakse tarbimiste jagamisel korraga mitut meetodit. Näiteks tavatarbimised jagatakse mõõtja või mõõtjate poolt defineeritavate sõlmede vahel ning vooluhulga jagamise meetodit kasutatakse registreerimata tarbimiste jaotamiseks.

Fikseeritud tarbimise sidumise korral on tegemist manuaalse tegevusega ning tihtipeale kasutatakse vaid suurtarbijate määratlemiseks – juhul kui kõik tarbimised on mõõdetavad, siis pole sellel meetodil mõtet.

Tuleviku tarbimiste projektsioon on sarnane vooluhulga jagamise meetodile, kuid kasutatakse mingit tuleviku sündmust – näiteks maakasutust, eeldatavat elanikke arvu, tarbimise üldist kasvu ajas ühes polügonidega, mis esitavad transpordi tsoone, uusarenduspiirkondi jms. Üldjuhul pole tarbimised sellistel puhkudel teada ning seega tuleb tarbimise tihedust kasutada info ülekandmiseks tulevikku esitatavalt polügonidelt projekteeritud tarbimistele. Maakasutusest ning rahvaarvust tingitud andmestiku kasutamisest polügonide lõikes ning tarbimissõlme poolt kaetava ala juures tuleb juttu ka hilisemates teemades.

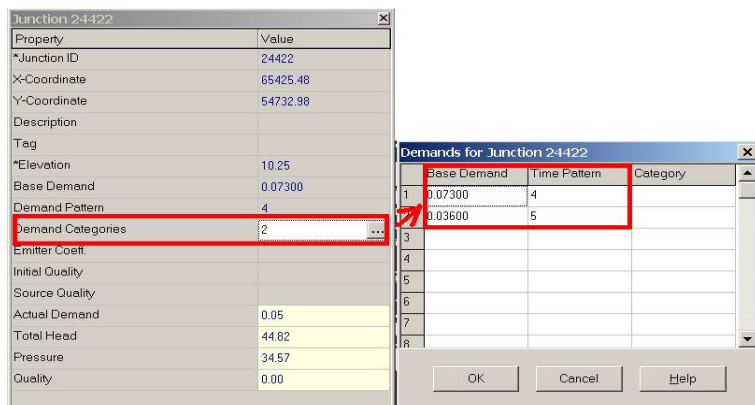
### Tarbimiste kategooriad

Tuleb ette olukordi, kus mõnda tarbimissõlme on vaja lisada mitu erinevat liiki tarbijaid – kategooriaid. Ühendatud tarbimine – juhul kui üks tarbimissõlm sisaldab erinevaid liike tarbijasi. Seda saab ära kasutada ka registreerimata vee märkimiseks eraldi tarbimisena.

$$Q_{i,t} = \sum_j B_{i,j} P_{i,j,t},$$

kus:  $Q_{i,t}$  – kogu tarbimine sõlmes  $i$  ajahetkel  $t$  ( $m^3/s$ );  $B_{i,j}$  – baastarbimine tarbimistüübile  $j$ , sõlmes  $i$  ( $m^3/s$ );  $P_{i,j,t}$  – tarbimisgraafiku kordaja tarbimistüübile  $j$ , sõlmes  $i$ , ajahetkel  $t$ .

Kategooriate kasutamine võimaldab väga lihtsalt teostada muudatusi ning see rakendub automaatselt kõikidele tarbijatele, kes seda kategooriat kasutavad.



Joonis. Tarbimiste kategooria defineerimine EPANET tarkvaras.

Tarbimise kategooriaid nimetatakse sõltuvalt mudeli suuruselt väga erinevate nimetustega – näiteks “üldkasutuses olevad hooned”, “tööstus”, “elumajad”. Samas võib eelpooltoodud kategooriaid nimetada veel täpsemini – näiteks “üldkasutuses olevad hooned” -> “koolid”, “restoranid” või “elumajad” kategooria kui “korrusmaja”, “eramaja” jpt. Silmas tuleb pidada, et vee-ettevõtte on üldjuhul loonud oma enda süsteemi kategooriate nimetamiseks ning üksusest võrdlust erinevate ettevõtete vahel teha ei saa – see raskendab oluliselt ka konsultandi rolli, kes võib korraga töötada mitme ettevõtte heaks.

## Massi tasakaal

Massi tasakaalu võtet võib kasutada täpsemate muutuste uurimiseks tarbimistes.

$$Q_{\text{tarb}} = Q_{\text{sisse}} - Q_{\text{välja}} + \Delta V_{\text{reserv}} / \Delta t,$$

kus:  $Q_{\text{sisse}}$  – keskmine tootmine ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_{\text{välja}}$  – keskmine tarbimine ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\Delta V_{\text{reserv}}$  – süsteemi talletav maht ( $\text{m}^3$ );  $\Delta t$  – aeg mahtude mõõtmiste vahel (s).

Mahuti mahtude arvestamisel tuleb arvestada erinevatel ajahetkedel tehtud mõõtmistest tulenevat märki erinevust (kas maht väheneb või suureneb, vastavalt kas tarbimist toetatakse või talletatakse süsteemi).

$$\Delta V_{\text{reserv}} = \sum_i (V_{i,t+\Delta t} - V_{i,t}),$$

kus:  $V_{i,t+\Delta t}$  – mahuti maht ajahetkel  $t + \Delta t$  ( $\text{m}^3$ );  $V_{i,t}$  – mahuti  $i$  maht ajahetkel  $t$  ( $\text{m}^3$ ).

Mahu muutus on vertikaalsete seintega mahuti puhul arvutatav järgmiselt:

$$\Delta V_{\text{reserv}} = \sum_i (H_{i,t+\Delta t} - H_{i,t}) A_{i,t},$$

kus:  $H_{i,t+\Delta t}$  – veetasapind mahutis  $i$  ajahetkel  $t + \Delta t$  (m);  $H_{i,t}$  – veetasapind mahutis  $i$  ajahetkel  $t$  (m);  $A_{i,t}$  – mahuti  $i$  veetasapinna pindala ajasammu  $t$  jooksul ( $\text{m}^2$ ).

## Ühiktarbimiste kasutamine

Uute klientide puhul on võimalik nende tarbimisi hinnata olemasolevate ning sama tüübiliste klientide põhjal. Modelleerija peab seetõttu teadma ühiktarbimist (nt hotelli ühe ruumi kohta) ning korrutama seda vastavalt tubade arvuga. Ühiktarbimise põhiliigid:

- Pindala kohta käiv ühiktarbimine (liitrit/ $\text{km}^2$ )
- Inimeste kohta käiv ühiktarbimine (liitrit/inimene; liitrit/töötaja)
- Loendusel põhinev ühiktarbimine (5 WC-d, 3 vanni jne)

## Registreerimata vesi

Ideaaljuhul peaks kõikide tarbijate mõõtmine andma sama veekoguse, mis võrku sisse antakse. Tegelikuses see nii aga ei ole. Põhjuseks on asjaolu, et võrgus esinevad registreerimata veekogused: Suurem osa sellest on põhjustatud leketest võrgus, mõõtmisvigadest ning registreerimata vee tarbimisest (nt illegaalsed ühendused). Registreerimata vesi lisatakse võrku, kui mistahes muu tarbimine – soovitatav on neid käsitleda eraldiseisvatena mõõdetud tarbimistest (võimaldab hinnata võrgu efektiivsust). Kuna tegemist on registreerimata veega, siis ei tea me täpselt, millisesse sõlme seda lisada – üks võimalus on see jaotada ära võrdselt või proportsionaalselt kõikide sõlmede vahel või jagada vaid sõlmede vahel, kus on suurem tõenäosus lekkeid leida (vanemad torud).

Registreerimata veeks loetakse ka lekkeid. Tegemist on suurima komponendiga registreerimata veest. Lekked võivad esineda torudel ja nende ühenduskohtades kuni lõpptarbija veemõõtjani ja/või mahutini välja. Kehtib üldine korrelatsioon, et lekked suurenevad ajas, kui ei rakendata mõnda lekete vähendamise meetodikat. Seetõttu võib uutes süsteemides olla lekkeid nt 5 % ja vanemates süsteemides kuni isegi 40 % (kõik sõltub süsteemist ning ka riigist). Lekked sõltuvad otseselt süsteemi rõhust (mida suurem rõhk, seda suurem lekke vooluhulk), torude purunemise sagedusest ning lekete otsimise meetodikatest – seetõttu on lekete hindamine süsteemis väga keerukas protsess.

Tarbimiste mõõtmisel võivad samuti esineda vead – mitmed veemõõtjad hakkavad vananedes valetama näiteks väikeste vooluhulkade korral. Süsteem võib omada ka illegaalseid ühendusi või teisi mõõtmata tarbimise liike. Mitte kõiki registreerimata tarbimisi ei saa vaadata kui varastamist. Näiteks hüdrantidest võetavat vett (vooluhulka) või torustike survepesu korral kasutatavat vett üldjuhul ei mõõdata.

## Tarbimise ebahühtlus

### Tarbimise kordajad

Baastarbimine, definitsiooni põhisel, ei muutu ajas. Reaalne olukord on aga midagi muud – tarbimine muutub ajas. Selle esitamiseks saab kasutada tarbimise kordajaid:

- Päeva – sõltuvalt tegevusest varieerub
- Nädala – nädalavahetus erineb tööpäevadest
- Hooajaline – näiteks turismi hooaeg
- Pikaajalised – tarbimise kasv seoses inimeste arvu kasvuga, muutused registreerimata vee hulgas jpm

Modelleerija arvestab tarbimise kordajaid järgmiselt. Statsionaarse olukorra ühe kindla tingimuse kirjeldamiseks kasutatakse:

- Keskmise päev (eile, täna, homme)
- Maksimaalne päev (eile, täna, homme)
- Tiptund (eile, täna, homme)
- Maksimaalne keskmise päeva rekord

Samas *EPS (extended period simulation)* mudelite koostamisel on vaja teada nii baastarbimist kui ka nende variatsiooni ajas.

### Maksimaalsed kordajad

Maksimaalne kordaja leitakse järgmiselt:

$$PF = Q_{\max} / Q_{\text{avg}},$$

kus: *PF* – Maksimaalne kordaja;  $Q_{\max}$  – maksimaalne päeva tarbimine ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_{\text{avg}}$  – keskmise päeva tarbimine ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Maksimaalseid kordajaid leitakse erinevate tingimuste võrdlemisel. Näiteks tuleviku maksimaalne tarbimine võib olla leitav kui *2 x päeva keskmist tarbimist* mingis süsteemis. Maksimaalsed kordajad kehtivad süsteemile ning mitte tarbimispunktile, kuna sinna on neid oluliselt keerulisem rakendada. Maksimaalsed kordajad on vahemikus:

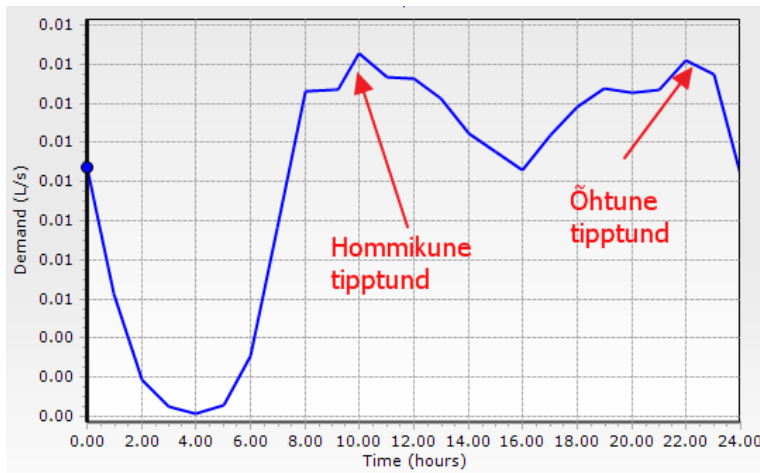
- Keskmise ja max päeva vahel: 1.2 – 3.0
- Keskmise päev ja max tund: 3.0 – 6.0

Maksimaalsed kordajad süsteemis lähevad üldjuhul suuremaks, kui registreerimata vee mahtu aja jooksul vähendatakse. See on tingitud asjaolust, et suured registreerimata mahud kipuvad tarbimisgraafikuid “tasandama”. Üksiku hoone maksimaalsed tarbimised saadakse süsteemi komponentide analüüsil – loetakse kokku kõik WC-d, kraanikausid jne – seejärel pannakse külge teatud vooluhulgas, kus on arvestatud nende koostöötamise tõenäosuseid.

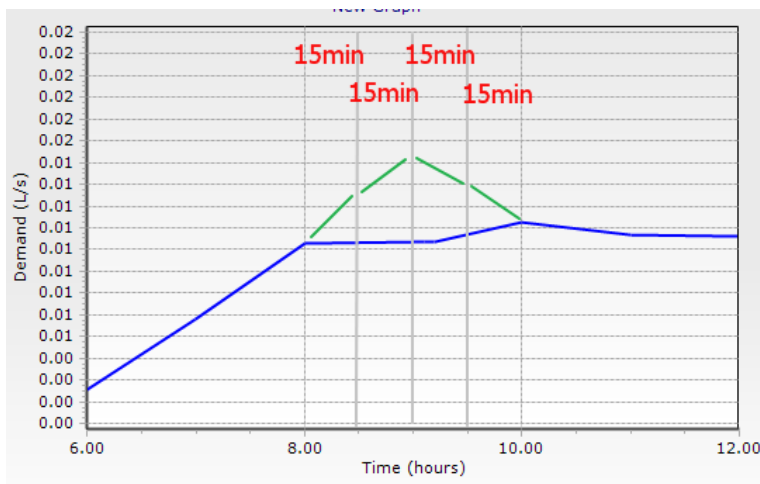
### Tarbimisprofiilid

Enamik veevõrke järgib 24h tarbimisprofiili – nn päevane tarbimisgraafik. Samas tuleb arvestada ka nädalavahetustest ning hooajast tingitud erisustega (nt suvel kasutatakse kastmisvett). Tüüpiline päevane graafik sisaldab kahte tippu ning madalat öist tarbimise nivood.





Need graafikud sõltuvad süsteemist. Näiteks väikesed linnad – üks tööstus, linn käitub suuresti tööstuse järgi (24h graafik). Nihutatud võivad olla ka tipud, et vältida ummistusi või tööle sõiduaeg on oluliselt pikem sõltuvalt elukoha-töökoha vahelisest kaugusest jne. Päevane graafik koostatakse massi jäävuse võtet kasutades. Graafiku tipp sõltub näiteks, kas valitakse 15-minutiline ajasamm või 1-tunnine ajasamm.



Joonis. 15-minuti ajasammuga saaksime tegeliku tipu aga 1h ajasammuga vale tipu.

Mõõtmiste sagedusest sõltub tarbimisgraafikute täpsus. Üldiselt ei soovitata väiksemat ajasammu kui 1 tund, vastasel juhul võivad tekkida arvutustel suuremad vead. See on põhjustatud asjaolust, et veetasapindade väikesed erinevused võivad oluliselt suuremat kaalu omada veekasutamise erinevustes. Seega kasutatakse väiksemat kui 1h ajasammu siis, kui veetasapind selles muutub kiirelt. Üldjuhul võib siiski tarbimisgraafiku ajasamm olla suurem kui hüdrauliline ajasamm.

Väga täpseid kliendi tarbimisprofiili saab üles võtta spetsiaalse tehnikaga, mis mõõdab veekasutust kliendi veemõõtja läheduses pikema aja jooksul. Automaatsed süsteemid võimaldavad infot edastada operaatorile, kes siis seda töötleb vastavate tarkvarade abil – tulemuseks on spetsiifiline kliendi tarbimisprofiil, mida põhimõtteliselt saaks rakendada ka teistele samatüübilistele klientidele. Tegemist on siiski kuluka ning aeganõudva protseduuriga, mistõttu kasutatakse seda tehnikat enamjaolt suurte klientide juures (nt tarbijad, kes saavad vähemalt 1% kogu veekogusest).

### Tarbimisgraafikute loomine

Enamik hüdraulilisi mudeleid kasutab tarbimisena baastarbimist sõlmes ning dimensioonita parameetrit, mis esitab tarbimisgraafiku kordajat igal ajahetkel (ebaühtlustegur). Põhimõtteliselt on

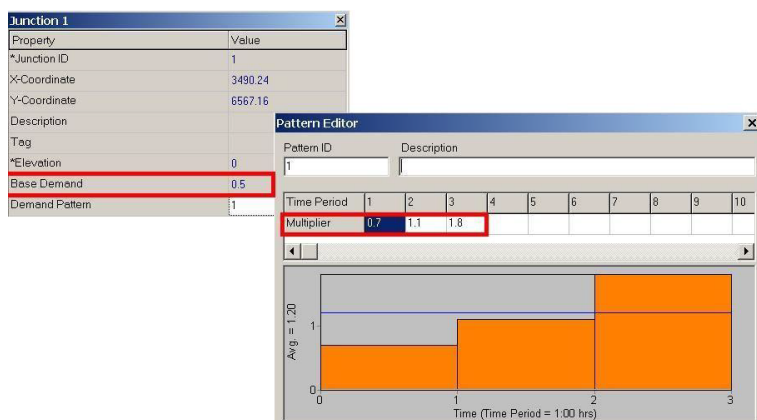
tarbimisgraafiku näol tegemist mõõdetud vooluhulgaga erinevatel ajahetkedel, kuid tarbimisgraafikute ideed rakendatakse seetõttu, et sellisel juhul saab neid kasutada ka teiste sarnaste tarbija tüüpide juures. Baastarbimine võetakse üldjuhul päeva keskmine tarbimine (kuid mitte alati, võib kasutada ka max tundi päevas vms):

$$Mult_i = Q_i / Q_{base}$$

kus:  $Mult_i$  – tarbimise kordaja ajahetkel  $i$ ;  $Q_i$  – tarbimine  $i$ -ndal ajahetkel ( $m^3/s$ );  $Q_{base}$  – baastarbimine ( $m^3/s$ ).

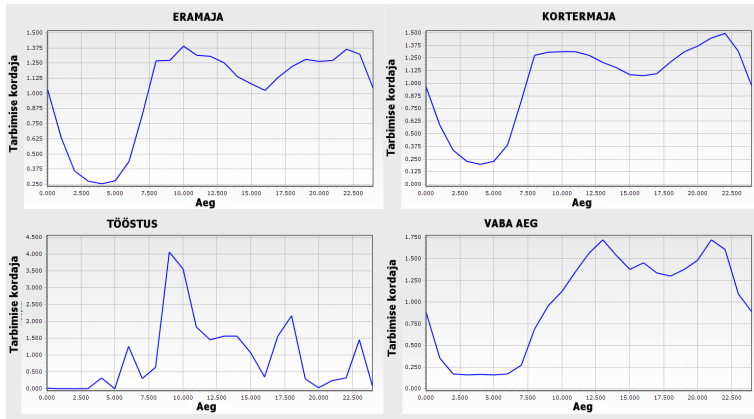
Näide: Olgu baastarbimine nt 0.5 l/s, siis graafiku tarbimiste jaoks erinevatele ajahetkedel saame esitada tabeli kujul (esimese kolme tunni osas).

Aeg (tund)	Tarbimise kordaja	Tarbimine
0:00	0.7	0.5 l/s * 0.7 = 0.35 l/s
1:00	1.1	0.5 l/s * 1.1 = 0.55 l/s
2:00	1.8	0.5 l/s * 1.8 = 0.9 l/s



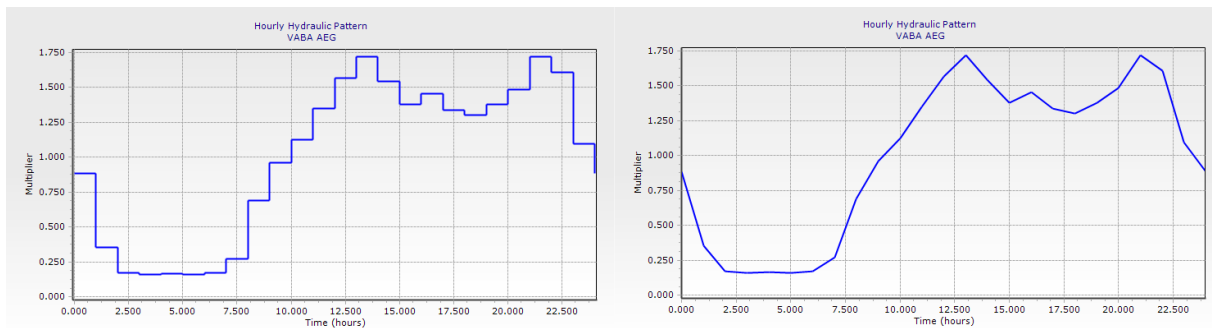
Joonis. Tarbimisgraafik esitatuna EPANET tarkvaras.

Tarbimisgraafikud sõltuvad tarbija tüübist, kuid ka ühe tarbija tüübi lõikes võivad need erineda. Lisaks võib üks tarbija tüüp omakorda jaguneda alamtüüpideks. Restorane on näiteks erinevaid – osadel on tipptund lõuna paiku, osadel aga õhtusel ajal. Riiete pood (ettevõtte) võib aga kasutada vett minimaalselt. Firms olev veetarbimine võib olla seotud kohvipauside ning lõunatundidega. Ehkki esineb tarbijaid, kus graafikud erinevad standardsetest, on nende kaal mudeli seisukohalt väike. Samas tuleb meele ikkagi pidada, et tööstused, mis tarbivad väga palju vett, nende mõjus on väga oluline. Seega kokkuvõttes – mida suurem üksiktarbija tarbimine on, seda olulisem on see mudeli seisukohalt.



Joonis. Tarbija profiilid/tüübid.

Tarbimisgraafikuid võib esitada kahel viisil: (a) *stepwise* – tarbimine on sammu vältel üks ja see sama; (b) *continuous* – graafik, mille muster on sõltumatu ajasammust – interpoleerimine sobiva väärtuseni.



Joonis. Stepwise ning continuous esitusviisid.

Tarbimisgraafikute kordajad võivad muutuda, kui minnakse üle *continuous* ↔ *stepwise* peale ja vastupidi.

Aeg (tund)	Tarbimise kordaja	Stepwise (astmeline)	Continuous (pidev)
0:00	0.7	0.7	0.7
0:15	0.7	0.7	0.8
0:30	0.7	0.7	0.9
0:45	0.7	0.7	1.0
1:00	1.1	1.1	1.1

Tabel esitab, kuidas tüüpiline mudel esitab tarbimisi, kui ajasammu muuta 1h > 15min peale ajahetkel 0:00 – 01:00. Pane tähele, et kordaja võib oluliselt erineda *stepwise* ja *continuous* kasutamisel.

### Tarbimisgraafiku algushetk

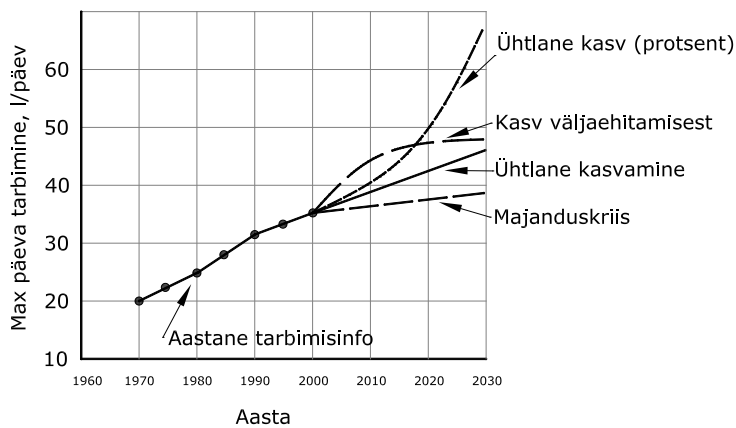
Iga graafiku juures oluline järgida, mis ajahetk (öösel kell 02:00 või hommik kell 06:00 jne) on mudeli käivitushetkeks. Vastavalt sellele tuleb neid aegasid ning graafikuid kohandada. Üldjuhul eeldatakse, et 24 tunni graafik kordub ka järgmistel päevadel, mistõttu 25.nda tunni kordaja on sama, mis 49.nda tunni kordaja. Tarbimisgraafikute kordused võivad tarkvarade lõikes olla seadistatavad erinevalt, seega tuleb sellele kohe alguses tähelepanu juhtida.

## Tarbimiste prognoos

Tarbimise prognoos on modelleerija seisukohalt üsna keerukas tegevus, kuna peab arvestama tarbimiskäitumist 5-, 10- ja 20-aasta pärast ning võtma arvesse uusi planeeringuid. Selliste protsesside läbiviimiseks oleks mõistlik luua teatud stsenaariumid ning võrrelda süsteemi sobivust erinevatele olukordadele. Üks võimalus oleks vaadata tarbimisharjumisi ajas tagasi ning nende põhjal teha järeldusi tulevikuks. Tuleb rõhutada, et modelleerija üksi ei tohiks hinnata tuleviku tarbimisi. Need peavad olema kooskõlas veevõrgu operaatori hinnangutega, kellel on hetke tarbimistest parem ülevaade. Nii jõutakse üldjuhul parema tulemuseni.

### Meetodid tuleviku tarbimiste prognoosimiseks

Kõige levinum viis on siiski vaadata ajaloos tagasi olevaid tarbimisi ning ekstrapoleerida seda tulevikuks. Hinnangud rahvastiku kasvus ning elamurajoonide paiknemine võimaldab planeerida tarbimissõlmede jaotust ning vastavaid torude läbimõõte. Oluline rõhk on aga ka tuleviku tulekustutussüsteemi nõuetest – sest need panevad sisuliselt paika torustike läbimõõdud – kriisisituatsioonides töötamine.



Seega tuleks arvesse võtta: (a) hinnangud rahvastiku kasvus vs tarbimissõlmede paigutus; (b) tulekustutussüsteemi nõuded tulevikus – torustike dimensioneerimine; (c) hinnata rahvastiku kasvu/kahanemist ning tarbimist inimese kohta eraldiseisvatena; (d) arvestada suurtarbijate lisandumisega või kolimisega/sulgemisega – suur mõju tarbimistele.

## Tulekustutusvesi

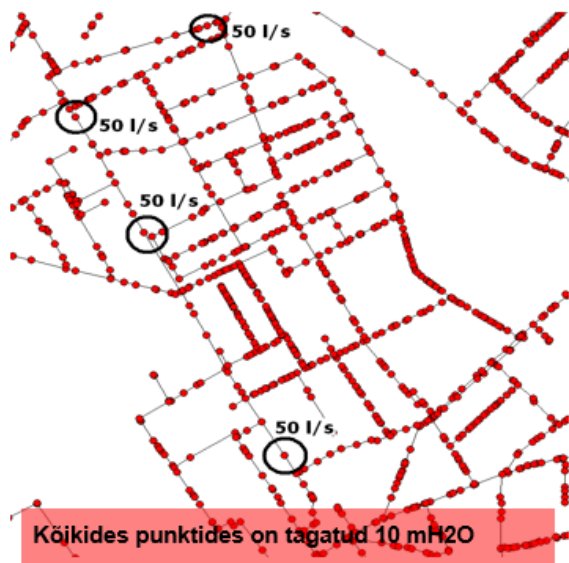
Tulekustutusvee vajadus sõltub tulekahju iseloomust. Eksisteerib kahte sorti süsteeme: (a) süsteemi dimensioneerimisel arvestatud ka tulekustutusvee vooluhulkadega; (b) tulekustutusvesi saadakse mahutitest ning süsteem (võrk) ise töötab vaid tava-tarbimistele. Üldjuhul kasutatakse (b) varianti maapiirkondades ning väiksemates asulates, kus ei ole mõistlik dimensioneerida torustike tulekahju olukorrale.

Süsteemis arvestatakse tulekahjuvee kättesaadavust l/s + mitu tulekahju võib korraga eksisteerida (mitmest punktist vett võetakse), et oleks tagatud ülejäänud võrgus hädavajalik tarbimine ning vabasurve ei langeks alla 10 m veesammast. Lisaks on oluline ka dünaamika. Tulekahju kestvuse mõju süsteemile. Näiteks USA-s on tulekustutussüsteemi disain määratletud ISO standardiga. Euroopas ühtne standard puudub (UK LGA, Saksa DVGW, Prantsuse Circulaire, Vene SNIP).

Modelleerimise näide: Riskianalüüs tulekustutusvee kättesaadavuse kohta.



Allikas: Ref #19



Joonis. Vooluhulka 50 l/s võetakse samaaegselt kõikidest näidatud punktidest.

### Ülevaateid rahvusvahelistest standarditest

Vajalik tulekustutusvee hulk (ISO Fire Protection Rating System 1998, AWWA M-31 1998) büroodele ning tööstustele:

$$NFF = 18 \cdot F \cdot A^{0.5} \cdot O \cdot (X + P),$$

kus: *NFF* – vajalik tulekustutusvee hulk (gpm); *F* – konstruktsiooni klass; *A* – efektiivne pindala (ft<sup>2</sup>); *O* – hõivatuse faktor (kaubamaja, farmaatsia tehas); *X* – lähim ehitis; *P* – uste ning seinte tüübid ja asukohad.

NFF jääb vahemikku:	32 – 757 l/s
Tavaline arvutuslik suurus on:	~ 221 l/s
Tulekahjude kestvusest sõltuvad vooluhulgad:	
< 158 l/s	kuni 2h
190 – 221 l/s	kuni 3h
> 221 l/s	kuni 4h

Sprinklerite vooluhulgad (NFPA 13 - 1998, NFPA 13D – 1999) eramajadele, büroodele ning tööstustele. Üldine reegel – sõltub kaetavast pinnast.

Korterimajad/Paarismajad:

- Töötab üks sprinkler – min Q = 1.14 l/s
- Töötab rohkem kui üks sprinkler – min Q = 0.82 l/s

Bürood/Tööstused:

- Varieerub sõltuvalt kaetavast pinnast ning ohtlikkuse klassist
- 2 – 14 l/min/m<sup>2</sup>

Voolikuühendused:

- Vooluhulk sõltub inimeste arvust pinnal
- Varieerub: 6.3 – 63 l/s

## Referentsid

### *Pildimaterjal*

Ref #19 Taust, Regio kaardirakendus, <http://kaart.delfi.ee/>