

Mudelite koostamine

Sisujuht

Sissejuhatus	4
Kaardid ja ülestähendused	5
Süsteemi selgitavad kaardid	5
Topograafilised kaardid	5
Ettevõtte poolt loodud joonised	6
Elektroonilised kaardid	6
Mudeli kirjeldus	8
Mudeli elementide nimetamise viisid	8
Ääritingimusi esitavad sõlmed	9
Veevõrgu topoloogia	9
Reservuaarid	11
Mahutid	13
Sõlmed	17
Torud	18
Pumbad	20
Karakteristlikud kõverad	20
Pöörete arv	20
Võimsus	20
Efektiivsus	21
Pumba efektiivsus vs pumba graafik	21
Pumba andmete sisestamine	21
Pumba esitus mudelis	21
Klapid	24
Isoleerivad klapid	24
Suunavad klapid	25
Kõrgusest sõltuvad klapid	25
Õhku väljalaskvad klapid ja vaakumit kontrollivad klapid	26
Kontroll-klapid	26
Klappide logiraamatud	27
Seaded (lülitid)	28
Toru seaded	28
Pumba seaded	28
Klapi seaded	28
Olemasolevate seadete kontroll	28

Simulatsiooni tüübid	29
Teised simulatsiooni tüübid	30
Skeletoniseerimine (mudeli lihtsustamine).....	31
Automatiseeritud skeletoniseerimine.....	33
Torude eemaldamine, ringistuste katkestamisega	36
Mitte-toru-elementide eemaldamine	36
Keerukamad skeletoniseerimised	36
Skeletoniseerimise lõpetamise kriteeriumid.....	37
Mudeli hooldamine	38
Referentsid	39
Sissejuhatus	40
Mudelite rakendamine projekteerimisel	41
Kalibreerimine ning lihtsustamine	41
Disain vooluhulk	41
Usaldatavus	41
Disain läbi mudeli – rollid	42
Mudeli rakendused.....	42
Toru dimensioneerimine	42
Torude dimensioneerimise protsess	43
Veevarustussüsteemi probleemide lahendamine.....	44
Aladimensioneeritud torud	44
Ebapiisav pumpamine	44
Püsivalt madal rõhk	44
Suured rõhud madala tarbimise perioodil	44
Üledimensioneeritud torud.....	45
Pumpamise analüüs	46
Pumpamise skeemid	46
Pumba valik/disain	46
Suletud süsteem	46
Pumpamine läbi PRV / PSV	47
Pumpamine läbi pumba pöörete reguleerimise	47
Pumpamine mahutiga süsteemi.....	47
Pumpamine mahutiga süsteemi ja mahutist süsteemi	48
Pumpamine survepaaki (mahutisse)	49
Pumpamine puurkaevust	49
Survekaod pumba imitoru poolses otsas	51
Veevarustussüsteemi laiendamine	52
Survetsoonide rajamine	53

Süsteemi karakteristikku koostamine	56
Survetsoonide teenindamine madalama rõhuga	60
<i>Pressure reducing valve (PRV)</i>	60
Kontrollklapp	61
<i>PRV + PSV</i>	61
Süsteemide rekonstruktsioon	62
Toru asendamine	62
Paralleeltoru lisamine	62
Toru läbipesu ning sisepinna katmine	62
Toru sissetõmme	63
Toru paisutamine	63
Jooksev kulu ning kapitali maksumus	64
Mahutite disain ja opereerimine	65
Optimeeritud disain / rekonstruktsioon	66
Terminoloogia	66
Optimeerimise meetodid	69
Geneetiline algoritm	74
<i>Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA)</i>	79
Optimeerimisega seotud probleemid	80
Ülevaade alusdokumentidest	82
Ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni (ÜVK) arendamise kava	82
Perspektiivskeem, eelprojekt	82
Detailplaneering	82
Põhiprojekt, tööjoonised	82
EVS standard EVS 921:2022 (Veevarustuse välisvõrk)	83
Referentsid	84

Sissejuhatus

Teises peatükis märkisime, et veevõrgumudel on tegeliku olukorra matemaatiline peegeldus. Enne kui saame aga asuda mudeli loomise juurde, peame suutma defineerida, mis asi on võrk. Selles peatükis puutume ennekõike kokku andmeallikatega, mis on vajalikud, et mudelit üles ehitada. Peatüki lõpus keskendume aga juba algse mudeli lihtsustamise võtetele. Mudeli lihtsustamine on vajalik ja ka mõistlik, kuna mudelina pole vaja kirjeldada tegeliku olukorra kõiki detaile. Seda eeldusel, et väiksem detailsus ei vähenda otsuste paikapidavust.

Kaardid ja ülestähendused

Enamlevinud infoallikateks, mille põhjal saab veevõrku tundma õppida on: (a) süsteemi selgitavad kaardid; (b) ettevõtte poolt loodud joonised ning (c) elektroonilised andmefailid.

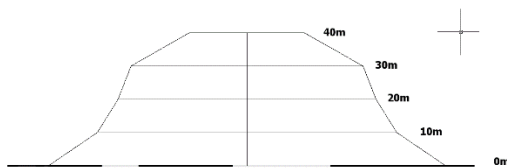
Süsteemi selgitavad kaardid

Kirjeldavad väga laia süsteemi karakteristikute valimit:

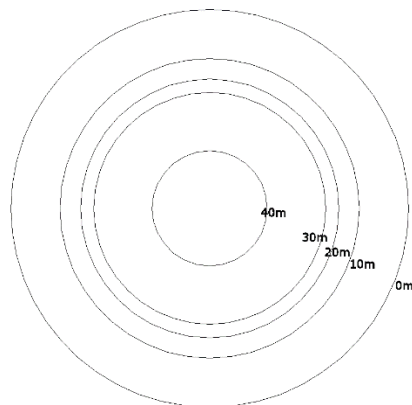
- Torude liinid, joondumine, materjal, diameeter jpm
- Süsteemi komponentide asukohad (mahutid ja klapid)
- Survetsoonide piiriid
- Kõrgusmärgid
- Mahutite karakteristikud parameetrid
- Taustinfo – teed, uusarenduse piirkonnad
- Teised ettevõtted/allüksused – veepuhastusjaamad jne

Topograafilised kaardid

Topograafiline kaart esitab samakõrgusjooned maapinna kohta. Allolev pilt esitab topograafilise vaate ja lõike sfäärilist.

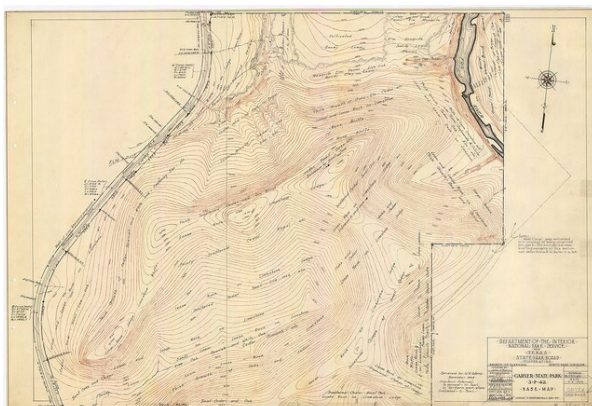


Külgvaade



Pealtvaade

Topograafilisi kaarte esitatakse teatud kõrgusmärkide intervallide tagant, nt 1m. Läbi topograafiliste kaartide on võimalik leida sõlmele lähim samakõrgusjoon ning interpoleerida selle järgi sõlme kõrgusmärk. Mida täpsem kaart seda täpsema interpoleerimise saab läbi viia. Juhul kui maapinna kõrgusmärke ei ole võimalik piisava täpsusega saada, siis tuleb infot kaasata teistest allikatest.

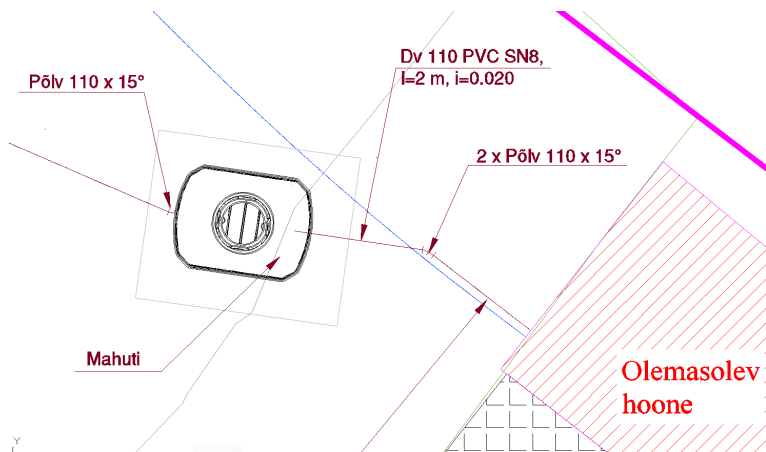


Joonis. Tegelik topograafiline kaart (allikas: Ref #01).

Topograafilised kaardid on kättesaadavad ka *DEM (digital elevation model)* formaadis, mida saab kasutada elektroonseks interpoleerimiseks. Samas tuleb meeles pidada, et nende kaartide täpsus sõltub topograafilise kaardi täpsusest, millel need põhinevad.

Ettevõtte poolt loodud joonised

Joonised, mis hoiavad endas projekteeritud torustikke ja eksploatatsiooni käigus tekkinud muudatuste infot ja/või detailseid jooniseid nt mahutite, pumplate kohta – ühenduste skeemid (põlved, kolmikud jne).



Elektroonilised kaardid

Vee-ettevõtted võivad omada infot väga erinevates elektroonsetes formaatides – tabelite põhiseist andmebaasist kuni graafiliste joonisteni ja GIS andmebaasideni välja. Tabelite põhine (mitte graafiline esitus) – mh tekstipõhine mudeli info (nt ka *EPANET inp* fail) – topograafilisi vigu on väga raske avastada, samas on sellise info ärakasutamine ainuvõimalik, kui soovida saada täpseid mudeleid.

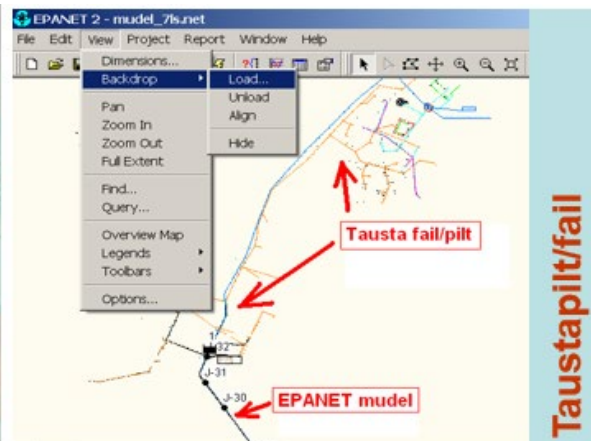
	A	B	C	D	E	F	G
1	Label	Maapind	X	Y			
2	J-8	73.0	12027.470	32281.7775			
3	J-5	82.0	12027.470	32056.7775			
4	J-2	67.0	11726.470	31831.7775			
5	J-9	55.0	12327.470	32281.7775			
6	J-6	56.0	11425.470	32281.7775			
7	J-3	85.0	12027.470	31831.7775			
8	J-7	67.0	11726.470	32281.7775			
9	J-4	61.0	11726.470	32056.7775			
10	J-1	73.0	11425.470	31981.7775			
11							

Navigation: Junction / Pipe / Reserv / Pump / Pump_definition / Mahuti / Demand

Kui aga rääkida *CAD (computer aided design)* joonistest, siis nende loomiseks on kaks põhimeetodit: (a) digitaliseerimine (uue kihi loomine) (puuduseks, et ei ole vahetu kontakt arvutiekraaniga); ning (b) skaneerimine ja/või faili konverteerimine modelleerimispaketile sobivalt ning selle nii-öelda aluseks/taustaks võtmine (*backdrop*) – eeliseks on see, et tegemist ühe keskkonnaga – arvuti ekraanil on kõik ühes kohas.



Digitaliseerimine



Taustapilt/fail

Allikas: Ref #02

GIS (*geographic information system*) seob aga omavahel andmebaaside tüüppäringud ja statistilise analüüsi ühtseks tervikuks ühes unikaalse visualiseeringuga ning geograafilise analüüsi eelistega. Ehkki info on erinevatel kihtidel, saab seda omavahel võrrelda ning teostada erinevaid analüüse: (a) lähima objekti valiku analüüsi – kliendi kindel kaugus lähimast sõlmest; ülekatte analüüsi – määramaks kõik sõlmed, mis on kindlas alas; (c) võrgu analüüsi – kõik majapidamised, mis jäävad toru purunemisest tingitud häire piirkonda; ning (d) teostada visualiseerimist – graafiliste plaanide esitamine.

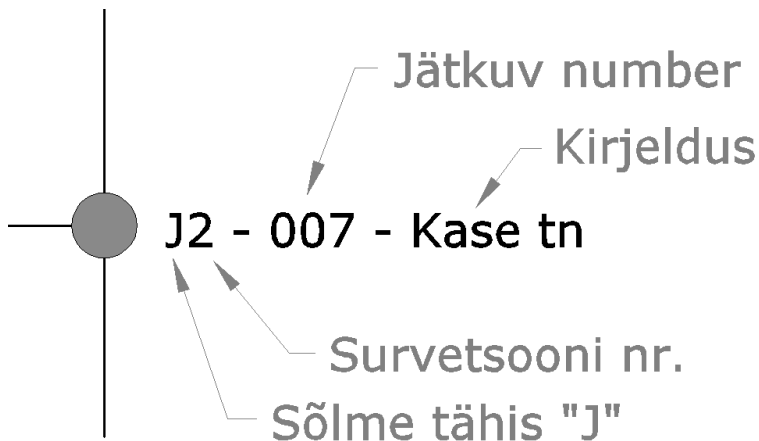
Mudeli kirjeldus

Võrkude peamised elemendid on sõlmed (omadused kindlas punktis) ning torud (seosed sõlmede vahel).

Element	Tüüp	Juhtiv roll
Reservuaar	Sõlmpunkt	Vee sisenemis-punkt võrku
Mahuti	Sõlmpunkt	Veevaru talletamiseks ning tipptunni kompenseerimiseks
Sõlm	Sõlmpunkt	Vooluhulga eemaldamiseks (tarbimine) või vooluhulga lisamiseks
Toru	Link	Vee liigutamine ühest sõlmest teise
Pump	Sõlmpunkt või link	Surve tõstmiseks võrgus, et kompenseerida näiteks maapinnast tulenevad erinevused
Klapp	Sõlmpunkt või link	Rõhu või vooluhulga kontrollimiseks mingil etteantud kriteeriumil

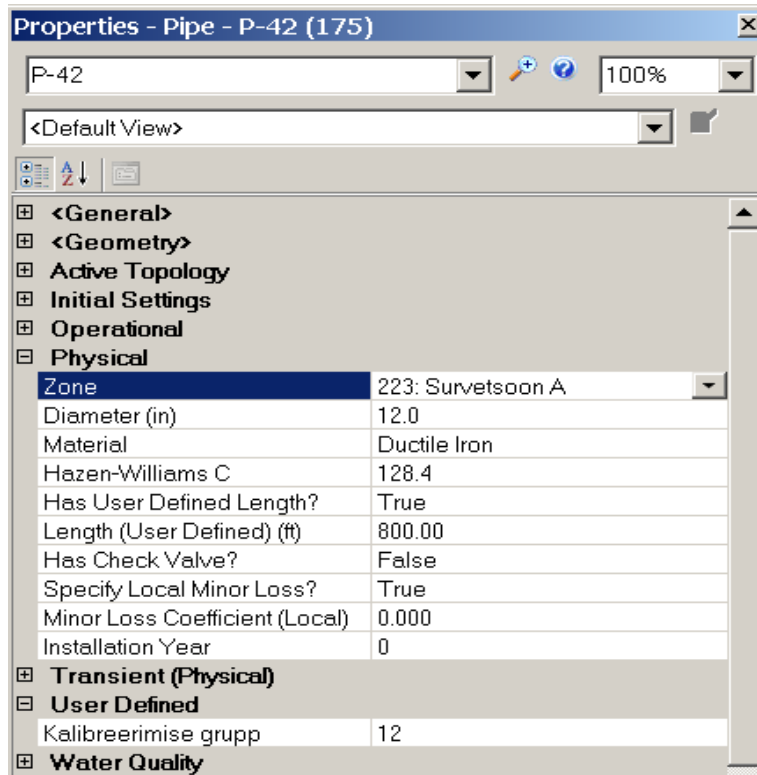
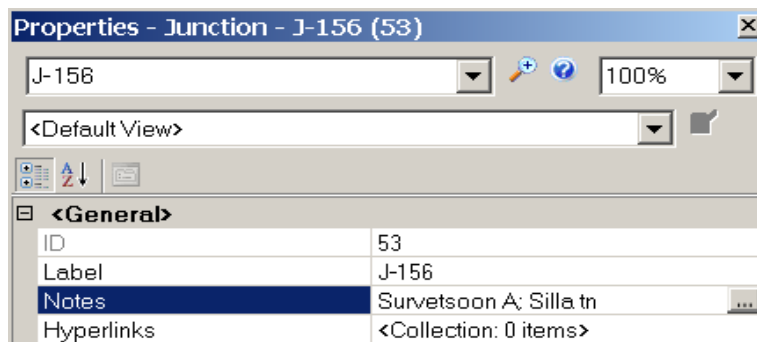
Mudeli elementide nimetamise viisid

Oskuslik elementide nimetamise süsteemi välja töötamine aitab hiljem neid paremini identifitseerida. Eesmärk on elementide nimed viia kokku reaalse süsteemi objektidega. Samas tihtipeale kasutatakse põhinimetusena vaid tähistust *J-1*, *R-1* ning *P-1*. Vastavalt siis: *J* – ehk *junction* (sõlm); *R* – ehk *reservoir* (allikas, reservuaar); *P* – ehk *pipe* (toru, link). Samas kirjeldusena saab lisada ka muud vajalikku infot (nt asukoht, tänav, survetsoon jne).



Lisainfo järgi saame filtreerida kindlaid sõlmi, torusid jne – nt kalibreerimise juures on vaja grupeerida torud mingi omaduse järgi. Samas võib meid huvitada torustik, mis on rajatud teatud ajavahemikus.

Junction J-31	
Property	Value
*Junction ID	J-31
X-Coordinate	596817.11
Y-Coordinate	6473442.08
Description	Survetsoon A; Silla tn
Tag	



Ääritingimusi esitavad sõlmed

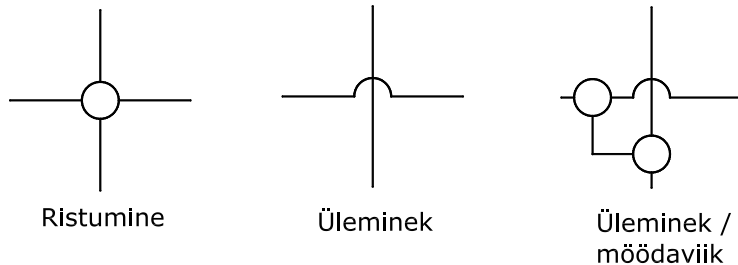
Ääritingimusi esitavateks sõlmedeks (*boundary nodes*) on sõlmed, mis kirjeldavad süsteemi lähte- või lõpp-punkti. Need jagunevad:

- Sõlm, mille kohta on teada surve;
- Voolhulgad, mis sisenevad võrku (või sealt välja) peavad olema kooskõlas selle teadaoleva survega;
- Ääritingimusi esitavateks sõlmedeks loetakse nt reservuaare (fikseeritud survega sõlmed) ning mahuteid;
- Iga mudel peab omama vähemalt ühte sedasorti sõlme ning see peab omama vähemalt ühte väljuvat toru, et survet saaks arvutada;
- Sellise sõlme isoleerimine (nt pumba või klapi sulgemine) võib põhjustada vigasid arvutustulemites.

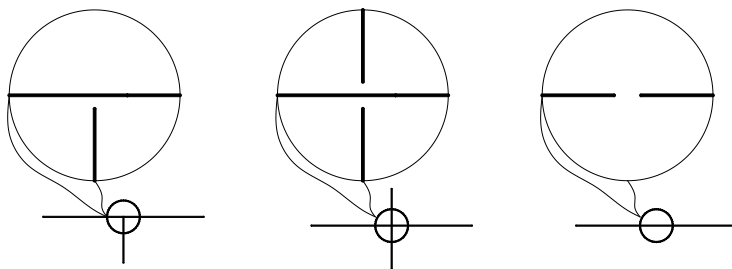
Veevõrgu topoloogia

Veevõrgu topoloogia täpsus omab suurt rolli mudeli loomisel. Topoloogialt leitakse nt torude ühenduskeemid – samas kui seda valesti interpreteerida – luuakse ühendus, kus seda tegelikult pole – oleme loonud täiesti erineva mudeli, mis võib töötada reaalsest võrgust teisiti. Seega: ühte liiki

kvaliteeti ei saa me üldjuhul asendada teist liiki kvaliteediga. Süsteemi kaardid kui topoloogilise andmestiku allikad: torude pikkused, materjalid ja ühendusskeemid. Veevõrgu topoloogia tüüpviigadeks on valed ühendused või andmete ülekandmisest (nt CAD joonised) tekitatud vead. Kui toru lõikub teise toruga kaardil, siis ei pruugi see alati tähendada seda, et need ka tegelikult on liidetud. Pane tähele, et mõned GIS rakendused võivad iga ülemineku korral lisada automaatselt sõlme – mis ei pruugi aga hüdrauliliselt olla korrektne.



Kui tegemist on möödaviiguga (*bypass*), on soovitatav see nii ka mudelisse lisada (mitte automaatselt ühendada), sest seeläbi saab kiirelt mudeli esitust muuta. CAD joonistel on valeühenduste tõlgendamisele vastupidised vead – torud pole lähemal vaatlusel (joonise suurendamisel) omavahel ühendatud.



- T-ühendus: Kas siin peab olema kolm lõikuvat toru või kaks mitte lõikuvat toru? Jooniselt loeme, et ühendust ei ole – samas võib see olla väga lihtsalt joonestamise apsakas
- Lõikuvad torud: Kas siin peab olema neli lõikuvat toru või kaks mitte lõikuvat toru?
- Peaaegu lõikuvad toru otsad: Kas kaks toru tegelikult ka pole ühendatud?

Tuleb meeles pidada – automatiseeritud tegevus hoiab kokku aega, kuid modelleerija peab olema teadlik veatekkimise kohtadest ja suutma need hiljem parandada. Mõned mudelid on võimelised ülekontrolli käigus esitama vigaseid kohti. Samas ei välista see võimalust, et alles jäävad raskesti määratavad vead.

Reservuaarid

Reservuaaridel on veevõrgu süsteemides väga ühene tähendus ja see võib erineda mõneti sellest, kuidas seda tegelikult kasutatakse. Reservuaar on ääretingimust esitav sõlm, mis suudab anda võrku või vastu võtta veehulka niivõrd suure mahuna, et survejoon ajas ei muutu. Tegelikuses ei saa aga lõpmatult kestvad allikat olla, samas mudeli seisukohalt eksisteerivad olukorrad, kus sissevoolud ning väljavoolud omavad väga väikest efekti sõlme survejoone muutusele. Mudelites kasutatakse reservuaare esitamaks järvi, põhjaveeallikaid ning allikaid. Reservuaari olulisemad parameetrid on survejoon ning vee kvaliteet. Definitsiooni põhiselt ei loeta reservuaare mahutiteks – seega mahtu kui sellist pole vaja defineerida.



Reservuaar kui järv (Haweswater Reservoir - Lake District)(allikas: Ref #03).



Lake Mead, Nevada (29.07.2007) (allikas: Ref #04).

Tehisjärv (reservuaar) võib olla mõjutatud hetke või pikemaajalisest kliima muutustest. *Lake Mead* on üks näide, kus 7-aastane põud põhjustas vee tarbimise kasvu nii, et veetasapind kukkus ligi 30 m, mis oli madalaim tase alates 1960.



Tehisjärv (Ladybower, Derbyshire) (allikas: Ref #05).

Järved kui veevõrgu lähteallikad võivad baseeruda nii pinna- kui põhjaveel.



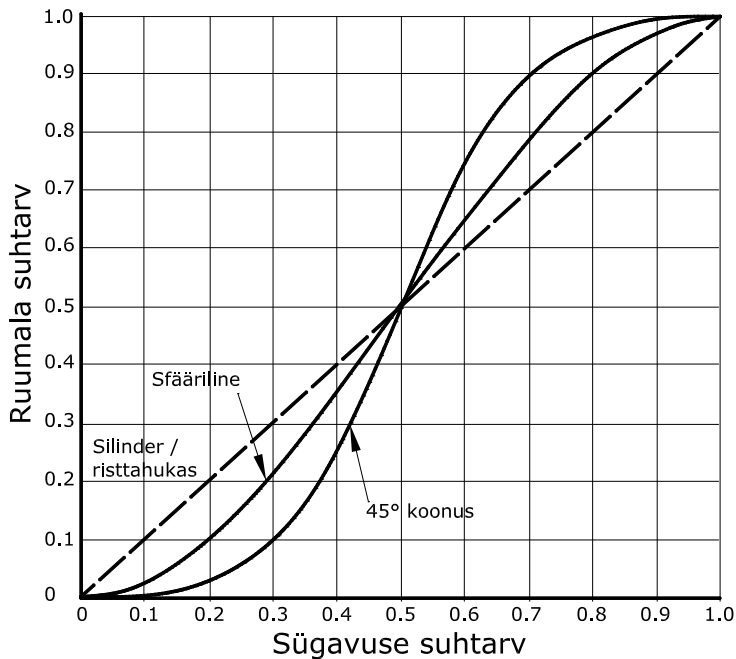
Ülemiste järv (pinnavesi) (allikas: Ref #06)



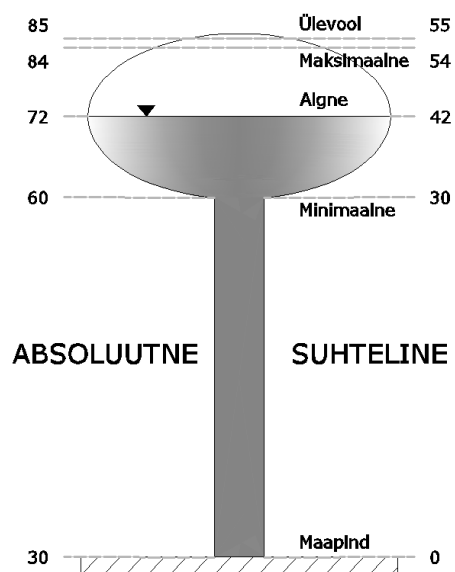
Squaw Valley (põhjavesi) (allikas: Ref #07).

Mahutid

Mahuti on samuti ääritingimust esitav sõlm nagu ka reservuaar. Aga erinevalt reservuaarist muutub mahuti survejoon ajas. Teisisõnu, mahuti võib täielikult täituda või tühjeneda (viimast püütakse siiski vältida). Statsionaarses režiimis võib mahutit vaadata reservuaarina. Samas *EPS (extended period simulation)* mudelite korral peab mahuti juures defineerima *veetasapind vs maht* (ruumala).

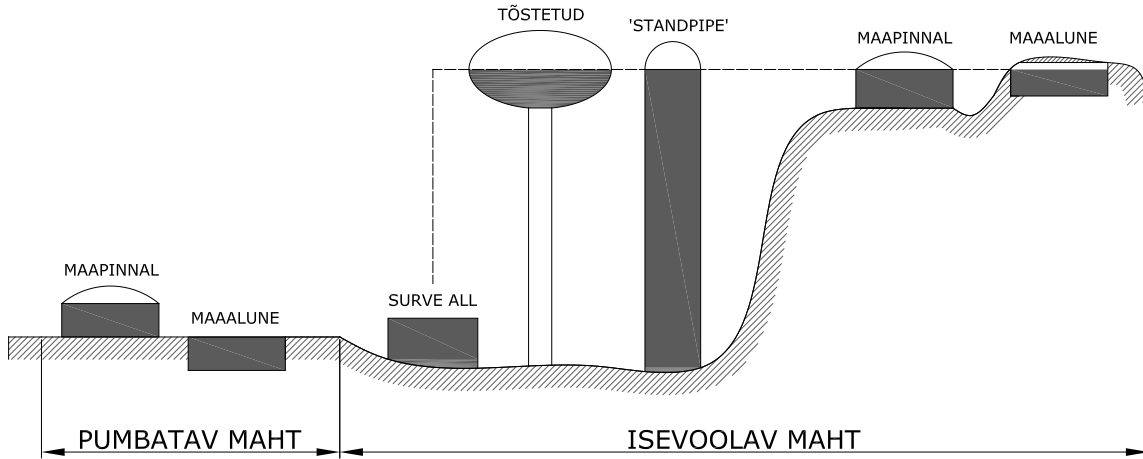


Eelnev pilt esitab seosed erinevate mahutite kujude kohta. Silindrilise mahuti jaoks on vaja teada lihtsalt läbimõõtu. Samas kui mitte-silindriliste mahutite korral on tegu keerukama ülesande püstitusega. Võib ette tulla, et modelleerimistarkvara ei võimalda kasutada mitte-silindrilisi mahuteid. Juhul kui kasutada seost mahu ja veetasapinna vahel, et määrata keskmist läbimõõtu, võib see põhjustada märgatava vea kogu süsteemis.



Sõltumata mahuti kujust, peab mahutile defineerima mitmeid veetasapindu (*HGL – hydraulic grade line*). Veetasapindade kõrgused võivad olla absoluutsed (*elevation*) või suhtelised (*level*). Seega võib

ühete kindlat veetasapinda esitada täiesti erinevate väärtustena. Mahuteid võib jagada konstruktsiooni (keevitatud teras, needitud teras, raudbetoon jt), kuju (silinder-, sfääriline, risttahukas jt), stiili (tõstetud, maapinnal asetsev, maasise) ning omanduse (vee-ettevõtte, erastatud) alusel. Olulisem on aga määratleda, kas mahuti annab vett süsteemi juurde või mitte (mahuti veetasapinna HGL = mahutist väljapool oleva HGL -ga).



Maapinnal või maa-all asetsevad mahutid ei pruugi süsteemi vett juurde anda – kõik sõltub nende survejoonest. Samas tõstetud (*elevated*) ja rõhu all (*pressurized, hydropneumatic*) olevad mahutid annavad vett süsteemi, sest nende HGL on sama, mis süsteemis. Mahuti tüüp, kus vee andmine süsteemi toimub gravitatsiooni teel (*free surface*), on lihtsaim ning enamkasutatavim mahuti tüüp. Pumpamist vajavate mahutite (*pumped storage*) korral tuleb kindlustada ka mahuti täitmine, mille juures omakorda kasutatakse mõnda rõhku hoidvat klappi, et see ei mõjutaks nii drastiliselt läheduses asetsevaid tarbijaid. Rõhu all olevad mahutid on osalt täidetud surve all oleva õhuga. Kuna vesi on mahutis survestatud, siis on ka HGL kõrgem, kui HGL veevõrgus.

$$HGL = C_f P + Z ,$$

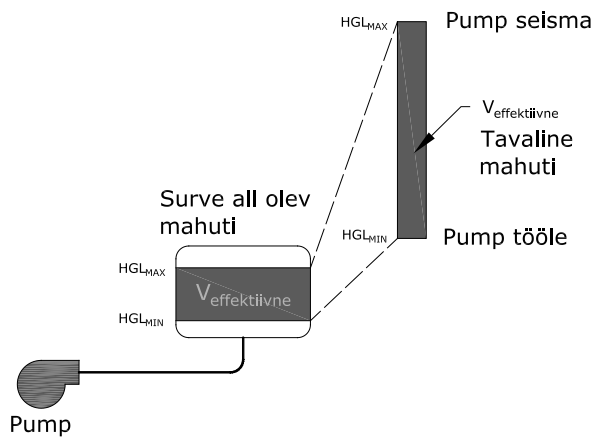
kus: HGL – vee survejoon mahutis (m); P – rõhk mõõdetuna mahutis (kPa); Z – mõõtpunkti kõrgus (m); C_f – üleminekukoefitsient ($SI = 0.102$).

Eeltoodud valem töötab suurepäraselt statsionaarse režiimi tarvis. EPS mudelite juures on vaja mahuti teisendada esmalt vabapinnaga esitatavaks mahutiks. Selleks arvutatakse mahuti maksimaalne ning minimaalne HGL ning seejärel mahuti ristlõige.

$$A_{eq} = \frac{V_{eff}}{HGL_{max} - HGL_{min}} ,$$

kus: A_{eq} – ekvivalentse mahuti pindala (m^2); V_{eff} – efektiivne mahuti ruumala (m^3); HGL_{max} – maksimaalne mahuti survejoon (m); HGL_{min} – minimaalne mahuti survejoon (m).

Rõhu all olevale mahutile vastav mahuti mudelis võib esitada järgmise joonisena.



Tõstetud mahutite näiteid.



Allardt (Tennessee) (allikas: Ref #08).



Pleasant View (Tennessee) (allikas: Ref #09).

Silindriliste mahutite (*standpipe*) näiteid.



Belton – SC (1909)
(150'000 gallonit) (allikas: Ref #10)



Henderson – NC (allikas: Ref #11).

Maapealsete mahutite (*grounded*) näiteid.



Water tank (Arlington, TX) (allikas: Ref #12).



Water tank (North Richland Hills, TX) (allikas: Ref #13).

Maa-aluste (*buried*) mahutite näiteid. Inglise keeles kasutatakse ka mõistet *underground* kui vähemalt 10% mahutist on maa-all.



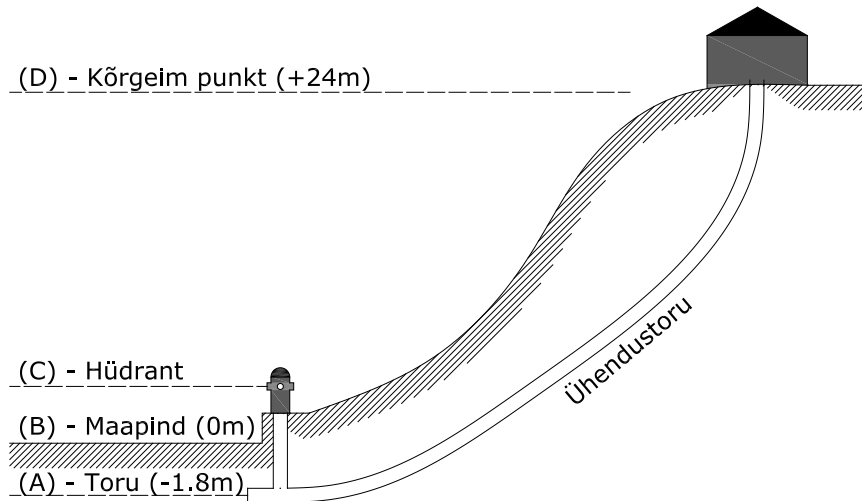
Maaaluselised mahutid (allikas: Ref #14).



Jaigarh Fort - Jaipur – India (6M gallonit!, ~ 1726)
(allikas: Ref #15).

Sõlmed

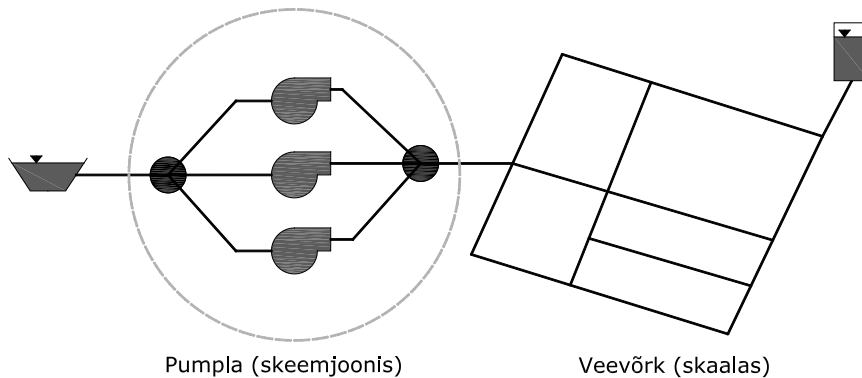
Sõlmede ülesanne on ühendada omavahel üks (*dead end*) või rohkem toru. Lisaks saab nende kaudu lisada süsteemi tarbimised (väljumised) või sisenemised (täiendavad sissevoolud). Sõlmed ei esita reaalse võrgu tegelikke elemente, sest kliendi tarbimised on üle terve toru lõigu. Tarbimised koondatakse sõlmedesse teatud vahemaa tagant, see on oluline lihtsustus küll mudeli koostajale, mille mõjusid süsteemi täpsusele tuleb hinnata – nt skeletoniseerimine (lihtsustamine). Üldjuhul ei põhjusta tavatarbijate selline jagamine mudeli suuri lahknevusi reaalse võrguga. Sõlme põhiparameetrik on selle kõrgusmärk. Kõrgusmärki võib aga sisestada erinevalt. Näiteks: (a) toru keskjoon; (b) maapind; (c) hüdrandi kõrgusmärk; või (d) maapind kõrgeimas tarbimispunktis.



Igal variandil on omad eelised. Mistahes varianti kasutades, tuleks seda kasutada üle terve mudeli, et vältida segadust. Lekete jaoks on mõistlik kasutada varianti (a) – rõhud torus. Aga ka juhul, kui torud asetsevad maa peal (masuudi/nafta torustikud), maapinna kõrgusmärke on lihtsaim mõõta, variant (b). Varianti (d) võiks aga kasutada siis, kui soovitakse vältida tarbijate kaebusi ebapiisava rõhujaotuse tekitamises. Mudeli kalibreerimisest lähtuvalt on väga oluline, et kõrgusmärgid oleks täpselt mõõdetud – sest kui mõõdetud ei lange kokku mudelis kasutatavale, siis ei oma rõhkude võrdlus mingit tähendust.

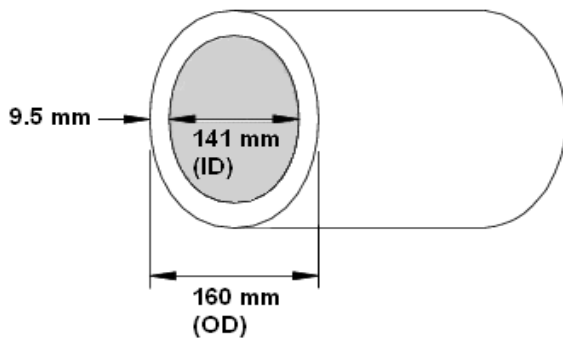
Torud

Toru on vooluhulka edasi viiv element ühest sõlmest teise sõlme. Torustik ehitatakse kindla pikkusega toru juppidest (nt 6m). Torud võivad omada torustike lõikes erinevaid vahetükke, nt põlved – suuna muutusteks; ning klapid – torustiku lõigu sulgemiseks. Modelleerimise seisukohalt vaadatakse toru lõiku ühe elemendina (kaasates ka vahetükid) kuniks torul on samad põhikarakteristikud (materjal, läbimõõt) üle terve pikkuse. Toru üheks põhiparameetrik on toru pikkus: kogupikkus ühest sõlmest teise ei pruugi olla sirgjoon. Lisaks võib seda mudelis esitada mudeli skaalal põhineva pikkusena või skemaatilise pikkusena.



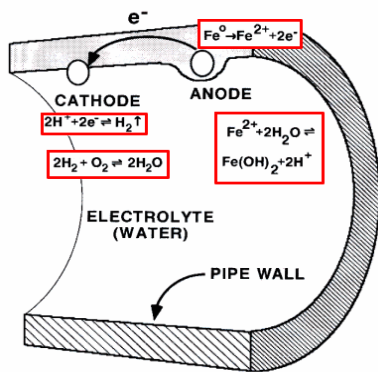
Skemaatilist pikkust saab kasutada siis, kui mingi mudeli osa vajab loetavamalt esitust. Neid kahte võib omavahel kombineerida (nt pumbajaam on skemaatiline ning ülejäänud mudel alates esimesest survepoolsest sõlmest on skaalas). Mõlemal juhul peavad siiski ühendusskeemid olema identsed.

Lisaks on torul selle läbimõõtu esitav parameeter. Läbimõõdu juures räägitakse erinevatest mõistetest, nt nimiläbimõõt (nominaalne-) – standardne tootjate lõikes või siis siseläbimõõt – erineb tootjate lõikes (survetugevusklassid). Kui kasutada toru nimiläbimõõtu, siis tuleb toru tegeliku läbimõõdu arvutamisel lisada ka toru karedustegur ($D-W$).



ID – Inner Diameter (siseläbimõõt); OD – Outer Diameter (välisläbimõõt).

Pane tähele, et kuna veekvaliteedi arvutustes saab oluliseks voolamise kiirus torus, siis selle juures on väga oluline, millist toru siseläbimõõtu kasutatakse. Siseläbimõõt võib ajas muutuda. Näiteks korrosioon või lubja sadestumine kaltsium-karbonaatide tagajärjel.



Allikas: Ref #16

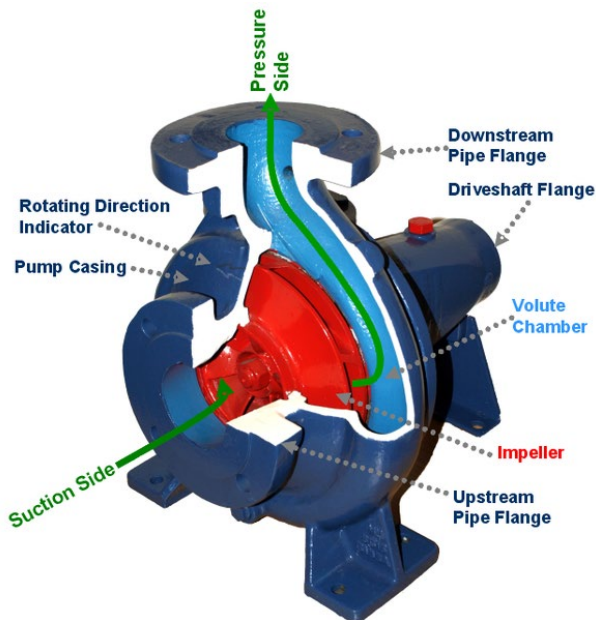


Allikas: Ref #17

Torude parameetriks on ka kohtsurvekadude märkimine. Kohtsurvekaod on tingitud erinevatest, toru lõigul paiknevatest elementidest (klapid, üleminekud, põlved jne). Üldjuhul võib ühel toru lõigul asetsevad kohtsurvekaod summeerida ning lisada need toru kohtsurvekao koefitsiendina. Enamjaolt võib pikkade torude juures kohtsurvekaod arvutustest välja jätta, sest hõõrdesurvekaod domineerivad. Samas pumplates tuleks kohtsurvekadusid siiski arvesse võtta.

Pumbad

Pump on element, mis annab süsteemile juurde energiat lisatava surve näol. Pumpasid kasutatakse survekadude ning staatiliste kõrguste vahede katteks. Veevõrkudes kasutatakse enamjaolt tsentrifugaalpumpasid, kus mehaaniline energia (ratta pöörlemine) antakse edasi vette, mis väljendubki omakorda surve tõusmises. Imitorust suunatakse vesi pöörlevale töörattele, mis viskab labade vahel oleva vee survetorusse.



Allikas: Ref #18

Karakteristlikud kõverad

Tsentrifugaalpumpade juures on pumba kasutus defineeritud kui funktsioon vooluhulgast. Vooluhulgast sõltuvad nii pumba: (a) surve (tõstekõrgus) – pikkusühikutes antav dünaamiline surve; (b) efektiivsus – summaarne efektiivsus (elektrikaablist vedelikuni) protsentides; (c) võimsus – võimsus, mida vajatakse pumba kasutamisel; ning (d) kavitatsioonivaru (NPSH – *net positive suction head*) – vaakumist üleval pool olev surve (pikkusühikuna), et vältida kavitatsiooni. Veevõrgu põhiprobleemide lahendamisel kasutatakse vaid tõstekõrguse seost. Teised graafikud on kasutatavad peale arvutusi, et määrata energia tarbimine, mootori vajadused (võimsus) ning imitoru parameetrid (NPSH).

Pöörete arv

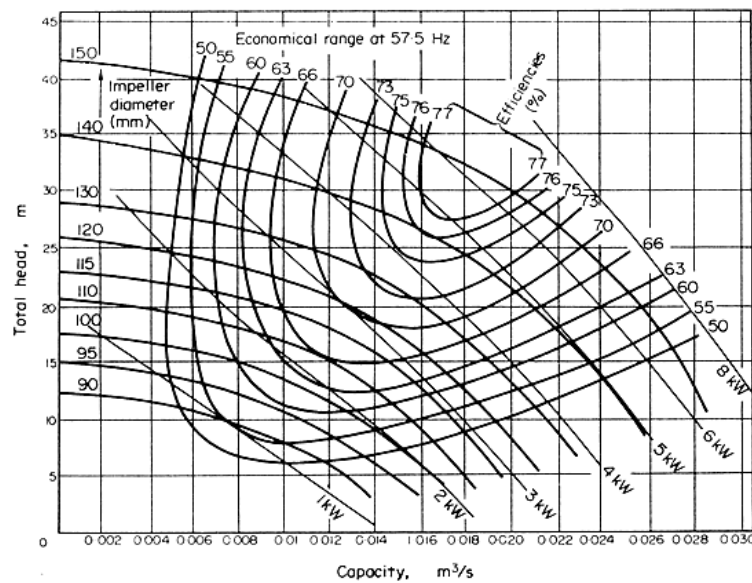
Pumpa iseloomustav töögraafik antakse kindla pöörete arvu korral. Fikseeritud pöörete arvu korral jääb pump alati konstantsele kiirusele. Muutuva pöörete arvu reguleerimisega muudetakse pumba graafikut vastavalt süsteemi vajadusele. Pöörete arvu reguleerimine põhjustab pumba surve vähenemist/suurenemist ning lisab seeläbi süsteemi opereerimisele paindlikkust. Näiteks kasutatakse sellist tüüpi pumbasid siis, kui süsteemis pole mahuteid või on need väga väikesed.

Võimsus

Pumba võimsuse taga peitub mitu erinevat tähendust: (a) sisendvõimsus (*input power*) – võimsus, mis antakse edasi mootorile, üldjuhul elektri näol; (b) efektiivvõimsus (*brake power*) – võimsus, mis edastatakse pumbale mootorilt; (c) vee-energia (*water power*) – võimsus, mis edastatakse pumbalt veele.

Efektiivsus

Mõistagi esinevad erinevate võimsuste ülekannetel kaod ning igale üleminekule saab lisada efektiivsuse: (a) mootori efektiivsus – efektiivvõimsuse suhe sisendvõimsusesse; (c) pumba efektiivsus – vee-energia suhe efektiivvõimsusesse; (c) kaablilt-veele (kogu) efektiivsus – vee-energia suhe sisendvõimsusesse. Efektiivsust esitatakse tavaliselt protsentides või siis arvvaartusena (maksimaalne efektiivsus on 1.00). Erinevad pumba efektiivsused sõltuvalt vooluhulgast. Samas mootori efektiivsus jääb enamvähem konstantseks. Lisaks võib esineda ka efektiivsus, mis kirjeldab pöorete arvu reguleerijat – seda nimetatakse mootori ja mistahes pöoretearvu reguleerimisseadeldise juures kui *driver*.



Allikas: Ref #19

Pumba efektiivsus vs pumba graafik

Pumba graafikuid esitatakse tihtipeale ühel ja samal graafikul. Pumba sisendvõimsus kasvab, kui vooluhulk kasvab ning surve kahaneb, kui vooluhulk suureneb. Iga pumba tööratla suuruse kohta eksisteerib vooluhulk, mis on maksimaalselt efektiivne. Suuremate või väiksemate vooluhulkade korral efektiivsus väheneb. Maksimaalset punkti efektiivsuse kõveral nimetatakse ka kui *best efficiency point (BEP)*. Pumba graafikuks on ka kavitatsioonivaru esitav kõver (*NPSH*).

Pumba andmete sisestamine

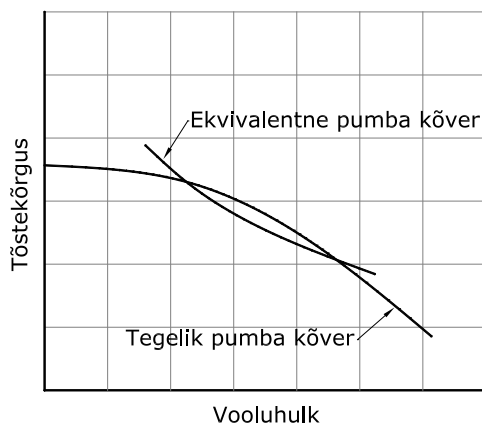
Üldjuhul omab operaator infot pumba graafikute kohta tabelite/jooniste kujul. Pumba graafiku võib saada pumba tootjalt pumba seerianumbri alusel, kuid meeles tuleb pidada, et kataloogis esitatavad andmed võivad veidi erineda pumba tegelikest andmetest. Pumba eksploatatsiooni käigus muutub pumba tegelik töögraafik (seda peab modelleerija aeg-ajalt kontrollima) ning sellisel juhul tuleb seda ka mudelis muuta. Maksimuse analüüside tegemiseks peab end kursi viima erinevate võimsust ning efektiivsust esitavate terminitega ning leitud väärtuse juures tuleb kasutatud mõiste ka välja tuua.

Pumba esitus mudelis

Pumpa võib mudelis esitada kahe sõlmena (siiski harvemini kasutatav esitusviis), mis pole omavahel ühendatud. Sellisel juhul oleks "sõlm 1" (imitoru poolne) – seal on tarbimine seatud võrdseks pumba vooluhulgaga ning "sõlm 2" (survetoru poolne) – seal on sissevool, mis võrdub pumba vooluhulgaga. Meeles tuleb pidada, et need mõlemad sõlmed peavad olema ühendatud kas reservuaari või mahutiga, vastasel juhul annab mudel veateated. Sisendvooluhulgad peavad aga võrduma süsteemi tarbimistega. Samas tüüpilisem esitus on ikkagi kasutada spetsiaalset pumba elementi, kus peame üldjuhul defineerima mingi matemaatilise seose, mis kirjeldab pumba graafikut. Pumba vooluhulga ja

tõstekõrguse vahel eksisteerib mitte-lineaarne seos. Üldjuhul piisab pumba graafiku esitamiseks kolmest punktist (kolme-punkti graafik). Pumba kolme-punkti graafiku punktide valikuna võib kasutada näiteks: (1) vooluhulk null; (2) tavaline opereerimise punkt, mis peaks üldjuhul vastama parimale efektiivsusele pumba graafikul; (3) pumba maksimaalne eeldatav vooluhulk. Mudelites on tavaliselt võimalik defineerida veel lisapunkte, kuid erinevates tarkvarades tõlgendatakse neid valitud lisapunkte erinevalt. Näiteks pumba iseloomustab tõstekõrgus siis kui vooluhulk on null (*cutoff* või *shutoff* punkt). Seda punkti võidakse aga tarkvarade poolt erinevalt defineerida: (a) lineaarne interpolatsioon valitud punktide vahel; (b) lähenda-polünoom; (c) vaadatakse kõiki punkte korruga ning luuakse polünoom või eksponentsiaalne lähendkõver.

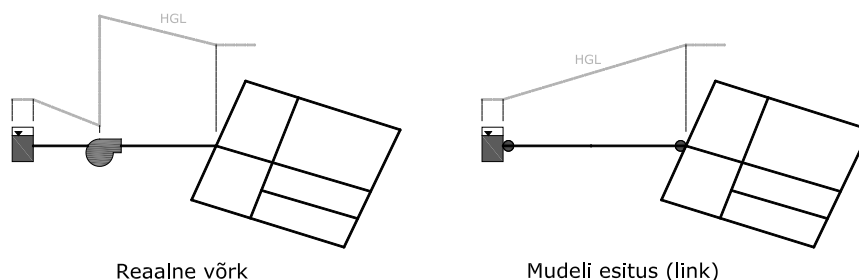
Mitmetes mudelites on võimalik pumba esitada ka konstantse võimsuse kaudu. Sellisel juhul pumba poolt toodetud vee-energia jääb konstantseks ja seda sõltumata pumbast läbi minevast vooluhulgast. Vee-energia on vooluhulga ja surve kombineeritud väärtus ning seega on see asümptootilise iseloomuga vooluhulga ja tõstekõrguse telgede suhtes.



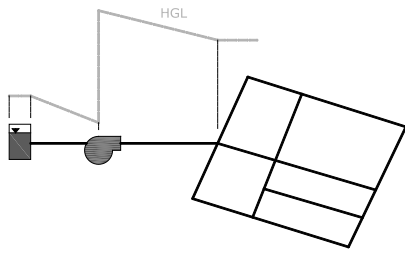
Modelleerijad kasutavad konstantse võimsuse graafikut seetõttu, et seda on lihtsam sisestada või pole pumba karakteristik kõver kättesaadav. Tuleb aga meeles pidada, et konstantse võimsuse graafiku kasutamine võib esitada ebatäpsusi arvutustulemustes – teisisõnu konstantse võimsuse graafik on täpne teatud vooluhulkade vahemiku juures, kuid mitte väga suurte ega väikeste vooluhulkade juures. Esialgsete tulemuste saamiseks sellest piisab, kuid pumba valimiseks niiviisi saadud tulemusi ei soovitata kasutada. Modelleerija peab silmas pidama ka asjaolu, et sisestatav võimsus ei ole mitte mootori võimsus vaid lisatav vee-energia.

Näiteks: 50 hp mootor, mis töötab efektiivsusega 90 %, töötab 80 % oma määratud võimsusest ning on ühendatud pumbaga, mis töötab 70 % efektiivsusega annab vee-energia ligikaudseks väärtuseks: 25 hp ($50 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.7 = 25$ hp). Mudelisse tuleb sisestada just väärtus 25 hp (ja mitte 50hp).

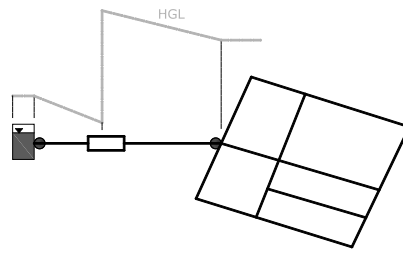
Sõltuvalt tarkvarast võib pumba mudelis esitada, kas sõlme või toru/lingina. Pump lingina ühendab imitoru poolse sõlme survetoru poolse sõlmega nii nagu teeb seda ka toru element. Lingina esitamine on matemaatiliselt korrektne, kuid võib põhjustada vigasid mudelisüsteemis.



Pump sõlmena ühes spetsiaalsete ühendusreeglitega (nt lubatud on ainult üks imitoru poolne ühendus) on modelleerija lähtepunktist vea-vabam, realistlikum ning ka lihtsam kasutada.



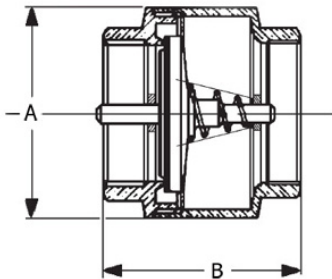
Reaalne võrk



Mudeli esitus (sõlm)

Klapid

Klapp on element, mida saab avada ning sulgeda erinevas ulatuses, et avaldada mõju vooluhulgale ning seeläbi kontrollides vee liikumist torustikus.



Check valve (allikas: Ref #20).



Gate valve (allikas: Ref #21).



Butterfly valve (aAllikas: Ref #22).

Klappe saab jaotada järgmistesse kategooriatesse: (a) isoleerivad klapid (*isolation valves*); (b) suunavad klapid (*directional valves*); (c) kõrgusest sõltuvad klapid (*altitude valves*); (d) õhku väljalaskvad klapid, vaakumit kontrollivad klapid; (e) kontroll-klapid (*control valves*).

Mõned klapid on võimelised piirama vooluhulka rõhu või surve baasil automaatselt, samas mõned klapid on mõeldud kasutamiseks manuaalselt (seksioneerimine) ning sulgevad mingi löigu täielikult.

Isoleerivad klapid

Tegemist on enamkasutatava klapi tüübiga süsteemis. Kasutatakse manuaalseks vooluhulga kontrolliks süsteemis (sulgemine, avamine) aga ka seksioneerimiseks ning survetsoonide tekitamiseks, et nende abil oleks võimalik lihtsamini jõuda lekkiva toruni ja/või parandada teatud võrgu toru. Isoleerivaid klappe on väga erinevat tüüpi: siiber (*gate valve* – enamkasutatav); pöördsulguriga drosselklapp (*butterfly valve*); ventiil (*globe valve*) ning kork klapp (*plug valve*). Kork klapp – silindrilise või koonuselise korgiga, mida saab sulgeda osaliselt või täielikult. On selge, et tarkvarasse ei ole mõtet sisestada süsteemi igat võimalikku klappi – see oleks liiga detailne esitus. Selle asemel kasutatakse lihtsalt toru parameetrit, mis simuleerib klapi olemasolu lõigul ning selle võib kinni või lahti panna. Küsimus on aga selles, kas klapi kohtsurvekadusid tuleb toru karedusteguri juures arvestada?

Näiteks vaatame *H-W* karedustegurit. Juhul kui toru karedustegur *C* on teada, siis klapi kohtsurvekadu saab selle *C* faktori juures arvestada järgmise valemi kohaselt:

$$C_e = C \left(\frac{L}{L + D \left(\frac{\sum K_L}{f} \right)} \right)^{0.54},$$

kus: C_e – ekvivalentne *C* faktor, mis arvestab kohtsurvekadusid; *C* – Hazen-Williams *C*-faktor; *L* – toru lõigu pikkus (*m*); *D* – läbimõõt (*m*); *f* – Darcy-Weisbach'i karedustegur; K_L – torus olev kohtsurvekadu.

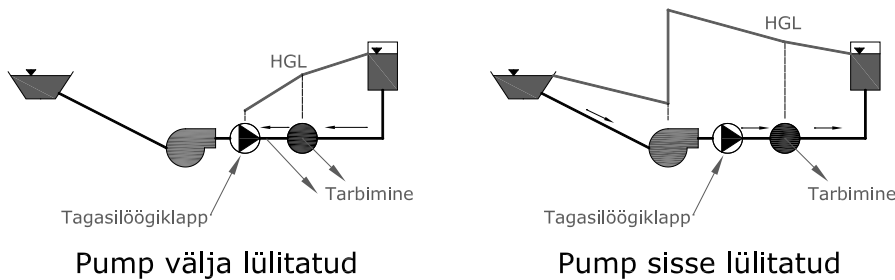
Kui suurt mõju avaldab *C* faktorile nt 1 siiber, 2 siibrit?

Näide: Olgu meil tegu toru lõiguga, mis on 122 m pikk, läbimõõduga 152 mm ning *C* faktoriga 120 ja $f = 0.02$. Võrdusest saame, et kui arvestada ühte avatud siibrit ($K_L=0.39$), siis $C = 118.4$. Kui arvestada

kahte avatud siibrit, siis saame $C = 116.9$. Teades, et C faktorid on väga harva teada ± 5 ühiku täpsusega, siis näeme, et siibrite kohtsurvekadude arvestamine ei oma suurt mõtet. Pane tähele, et kalibreerimise käigus saadav C faktor on tegelik C faktor, ning seda ei ole vaja mingit moodi kohtsurvekadude mõju arvestamiseks muuta.

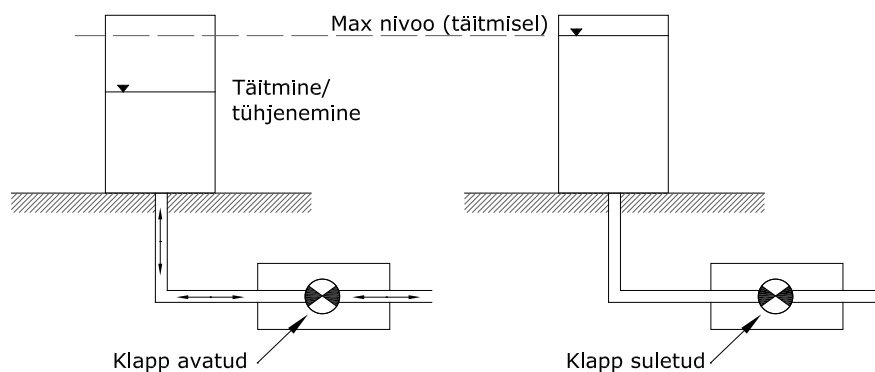
Suunavad klapid

Kasutatakse tagasivoolu vältimiseks või selleks, et võimaldada vedelikul voolata vaid ühes suunas. Iga pumba juures kasutatakse enamjaolt tagasivoolu vältivat klappi, sest vastasel juhul võib tagasivool (nt elektrikatkestusel) kahjustada pumba. Modelleerimispakettides üldjuhul omavad pumbad automaatselt kaitset tagasivoolu osas ja need sulguvad ise, kui tagasivoolu efekt tekib. Tagasivoolu efekti saab modelleerida, kui paigaldada toru imisõlme ja survesõlme vahele, mis avatakse vaid siis, kui pump seiskub. Sellel torul peavad olema ekvivalent pikkus ning kohtsurvekadu, mis põhjustab sama survekao kui pump, mis töötab tagurpidi. Tagasivool on väga ohtlik juhtudel, kui joogivee süsteem on ühendatud mõne joogiveeks mitte kasutatava süsteemiga. Seda nimetakse ristühenduseks ning tagasivoolu korral võib toimuda väga ohtlik vedelike omavaheline segunemine – sellistel puhkudel tuleb kasutada väga kõrgekvaliteedilisi klappe (nt tagasivoolu klappide süsteem, mis sisaldab ühte või mitut, jadamisi ühendatud kontrollklappi). Modelleerimispakettides kasutatakse taas seda klappi toru parameetrina ning kohtsurvekadusid saab vajaduse korral samuti lisada toru parameetrina.



Kõrgusest sõltuvad klapid

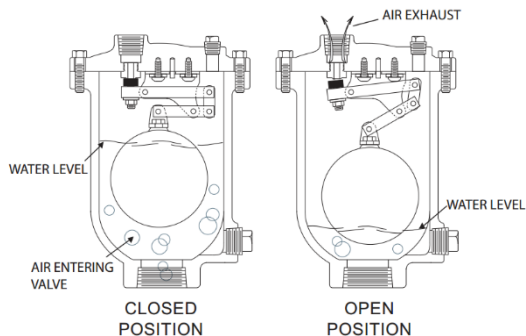
Klappe kasutatakse üldjuhul mahutite ees, mis katkestavad vooluhulga, kui mahuti on saavutanud maksimaalse lubatud nivoo ning avab toru, kui mahutis olevat vett soovitakse kasutada süsteemis.



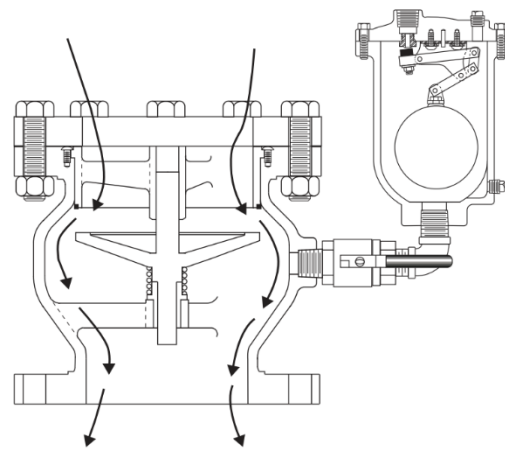
Modelleerimispakettides on seda tüüpi klappi automaatselt arvestatud kui mahuti piiridena (max ja min veetasapind). Samas kui mingil põhjusel klappi ei eksisteeri, võib toimuda mahuti üleujutus ning selle vältimiseks tuleks vastavat klappi siis kasutada.

Õhku väljalaskvad klapid ja vaakumit kontrollivad klapid

Enamik süsteeme kasutab spetsiaalset tüüpi õhku väljalaskvaid klappe, et lasta lõksu jäänud õhul väljuda süsteemist viimase opereerimise käigus ning vaakumit kontrollivaid klappe, et võimaldada õhu juurdevoolu süsteemi käivitumisel.



Õhku väljalaskev klapp (Allikas: Ref #23).



Vaakumit kontrolliv klapp (avatud olek) (Allikas: Ref #24).

Tavaliselt kasutatakse õhku väljalaskvaid klappe torustiku kõrgemates punktides, kuhu lõksu jäänud õhk talletub ning kallaku muutumisel, kui rõhk kõige tõenäolisemalt langeb alla atmosfäärilise (ümbritseva) rõhu. Sageli kasutatakse ka kombinatsiooni kahest klapist. Õhku väljalaskvaid klappe üldjuhul standardsetes modelleerimispakettides kasutada ei saa. Samas on nende elementide olemasolu ning kasutus olulise tähtsusega põhjalikema uuringute käigus nagu hüdraulilise löögi analüüsis.

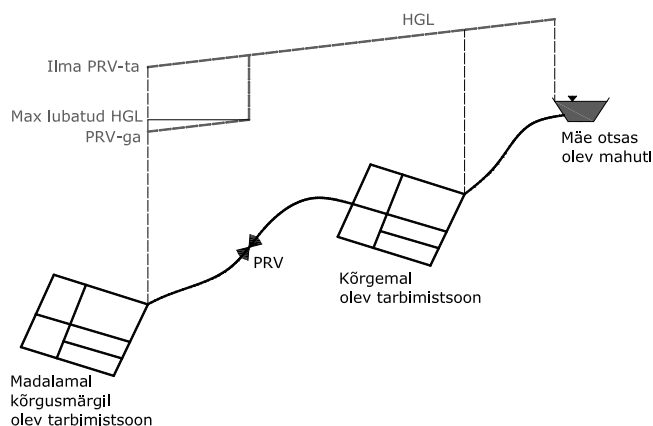
Kontroll-klapid

Kontrollklappid on teatud tingimus, mille alusel reguleeritakse rõhku ja/või vooluhulka süsteemis. Rõhu seade määramisel võib selleks olla nii rõhk ise kui ka kogusurve – kui kasutatakse rõhku, peab olema veendunud, et maapinna kõrgusmärgid on klappidele seatud õigesti. Peale sätte määramist klapi, arvutab mudel vooluhulga läbi klapi ning sisend ja väljund kogusurve (ja rõhu).

Kontroll-klapid on pumpadest keerukamad seetõttu, et need võivad omada rohkem erinevaid seisundeid (mitte lihtsal sees või väljas nagu seda pumpade juures kasutatakse). Need seisundid võib laias laastus jagada järgmiselt: (1) aktiivne: vooluhulka reguleeritakse automaatselt; (2) suletud - käsitsi suletud, näiteks kui isoleeriv klapp, mis asub kontroll-klapi juures, on suletud; või (3) mitte-aktiivne – klappi ignoreeritakse.

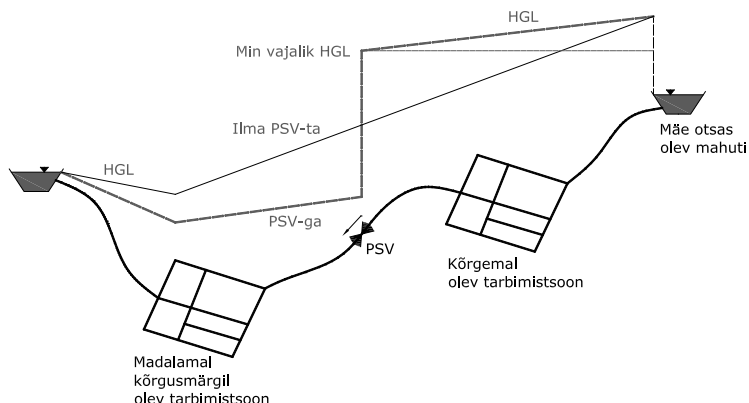
Aktiivse klapi juures saab omakorda vaadata kolme alamvarianti: (a) avatud: avatud täielikult; (b) suletud (1): suletud täielikult; (c) osaliselt avatud (*throttling*): pärsitav Q ja H.

Survet alandavad klapid (*pressure reducing valves – PRV*). Kasutatakse surve alandamiseks kohtades, kus surve võib põhjustada süsteemi kahjustusi – klapi eelnevat rõhku vähendatakse klapi abil defineeritud väärtuseni.



Kasutatakse survetsoonide eraldusjoontel, et vältida nõ alumise tsooni liigkõrgeid surveid, mis võib põhjustada torude lõhkemist. *PRV*-d on eraldiseisvad mudeli elemendid. Nende parameetriteks on vahetult enne klappi soovitud kogusurve, mida püütakse hoida, klapi staatus ning kohtsurvekao tegur. Kohtsurvekao tegur mängib rolli vaid siis, kui klapp on täielikult avatud, sest survekaod on nii ehk naa põhjustatud klapi püüdest rõhku vähendada. Ka *PRV*-sid saab esitada nii sõlmena kui lingina (sõltub tarkvarast) ja nende probleemsed situatsioonid on samad, mis pumpade korralgi.

Survet hoidvad klapid (*pressure sustaining valves – PSV*). Kasutatakse surve hoidmiseks kohtades, kus enneaegne alanemine võib põhjustada probleeme klapile eelnevas tsoonis. Modelleerija peab määrama vastava surve väärtuse, staatuse ning kohtsurvekao teguri.



Pärssivust kontrollivad klapid (*throttle control valves – TCV*). Vastupidiselt *FCV*-le, reguleeritakse siin kohtsurvekao tegurit, mis põhineb süsteemi mõnel teisel parameetril (nt surve kriitilises punktis või mahuti veetasapind). Tihtipeale on pärssivuse efekt klapi juures küll teada, kuid kohtsurvekao tegur, kui funktsioon klapi positsioonist, jääb teadmata suuruseks. Viimast saab aga üldjuhul leida tootja tabelitest.

Klappide logiraamatud

Enamik vee-ettevõtteid kasutavad klappide logiraamatuid, kus on kirjas klapi asukoht, tüüp ning staatus. Modelleerija seisukohalt võimaldab selline info anda väärtuslikku teadmisi keerukate süsteemi osade kohta, näiteks siis, kui süsteemi kaardid on puudulikud.

Seaded (lülitid)

Opereerimist tähistavad seaded (lülitid) võimaldavad automaatselt muuta elemendi staatust või sätet sõltuvana ajahetkest või lähtuvalt võrgu mingist tingimusest. Tegemist on automatiseeritud, süsteemi käiku muutvate seadetega, mis võimaldavad efektiivsemalt süsteemi tööd kontrollida ja seada. Näiteks pumba sisselülimine, kui surve süsteemis langeb alla etteantud väärtuse või kasutada hommiku tunde selleks, et täita mahutit veega. Mudelis on need esitatud eraldi elementidena või lisatakse tingimused põhielemendi juurde.

Toru seaded

Üldjuhul modelleeritakse toru alati avatuna või suletud. Mõnel juhul soovitakse torusid avada/sulgeda, et saaks sellega modelleerida klappi, mis automaatselt või käsitsi muutub vastavalt süsteemi seisundile. Kui kasutatakse klappi, mis muudab vooluhulka torus, siis peaks seda modelleerima: (a) kohtsurvekao tegurina, mis on rakendatud otse torule; (b) lisades vooluhulka kontrolliva klapi torule ning seejärel seda reguleerides.

Pumba seaded

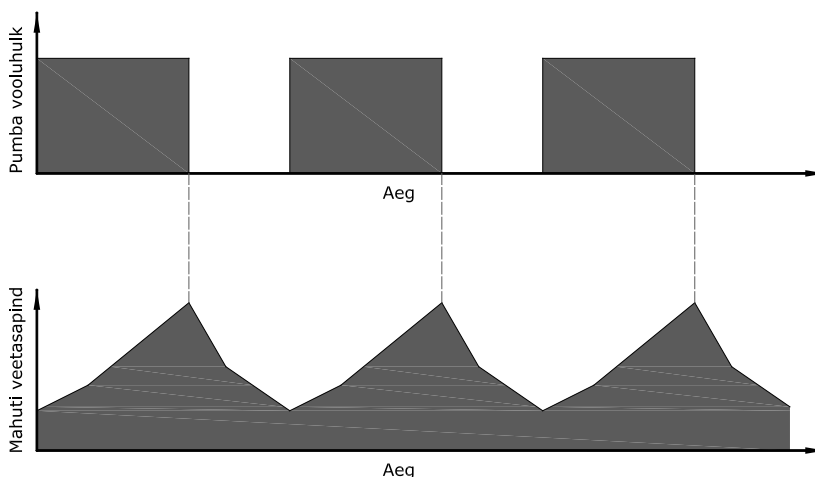
Lihtsaim pumba seade lülitab selle sisse või välja. Pöörete arvu reguleerivate pumpade juures saab aga seeläbi muuta pumba suhtelise kiiruse tegurit, et tõsta või langetada survet või vooluhulka. Kasutatavam pumba seade on seadistatud järgima mahuti veetasapindu. Pumbad klassifitseeritakse kui juhtiv pump (*lead pump*) ning viitega pump (*lag pump*). Juhtiv pump töötab, et täita mahutit teatud maksimaalse väärtuseni, sulgub seejärel ja hakkab tööle siis, kui mahuti saavutab etteantud miinimumi. Viitega pump alustab tööd, kui juhtiva pumba töötamisel jätkab mahuti tühjenemist ning sulgub, kui mahuti saavutab veetasapinna, mis on väiksem pumba maksimaalsest tõstekõrgusest.

Klapi seaded

Klapi seaded on sarnased pumpade omadele. Siin reguleeritakse klapi staatust (avatud, suletud või aktiivne) ning sätet. Näiteks võib operaator soovida reguleerida klapist läbi minevat maksimaalset vooluhulka allapoole, kui see põhjustab teatud ajahetkedel kriitilise rõhu klapi eelnevas tsoonis või avada klapp täielikult tulekahju olukorras.

Olemasolevate seadete kontroll

Juhul, kui olemasolevad seaded on teadmata, saab neid taastada, kui kõrvutada omavahel pumba logi ja mahuti veetasapinna graafikut.



Simulatsiooni tüübid

Peale baaselementide ning võrgu topoloogia defineerimist tuleb otsustada, mis tüüpi simulatsiooni soovime läbi viia ja lähtuvalt sellest ka lisaparameetreid seadistada. Simulatsiooni tüübid jagunevad: (a) statsionaarne simulatsioon; (b) dünaamiline simulatsioon.

Statsionaarses simulatsioonis arvutatakse Q , H (P), pumba opereerimise tingimused, klapi seisund jpt, kusjuures eeldades, et tarbimised ning ääritingimused ei muutu ajas. Tegemist on ligikaudse lahendiga tegelikust olukorrast. Võrdluseks fotograafiast – “blurred image”



Allikas: Ref #25.

Ligikaudsus väljendub: (a) pumbad lülitavad end sisse/välja; (c) klapid sulguvad osaliselt/täielikult; (c) tarbimised muutuvad; (d) mahuti veetasapinnad muutuvad. Seega on statsionaarse simulatsiooni näol tegemist kui ähmase pildiga liikuvast objektist – oleme midagi justkui fikseerinud ja leidnud sellele vastava lahendi. Siiski on tegemist väärtusliku infoga kindlaid tingimusi silmas pidades. See on esmane etapp, et liikuda keerulisema mudeli arvutuse juurde (nt dünaamiline, veekvaliteedi, tulekustutusvõimekus jm). Seda kasutatakse ka halvima olukorra analüüsimiseks (tipptunni tarbimine, tulekustutusvee kasutamine, süsteemi komponentide tõrked, milles aeg väga suurt rolli ei mängi.

Dünaamilises simulatsioonis määratakse mitmest statsionaarsest olekust koosnev mudeli käitumine üle ajaperioodi, kusjuures tarbimised ning ääritingimused muutuvad ajas. Tuleb ette olukordi, kus statsionaarsest mudelist jääb väheks, et hinnata tegelikku olukorda.



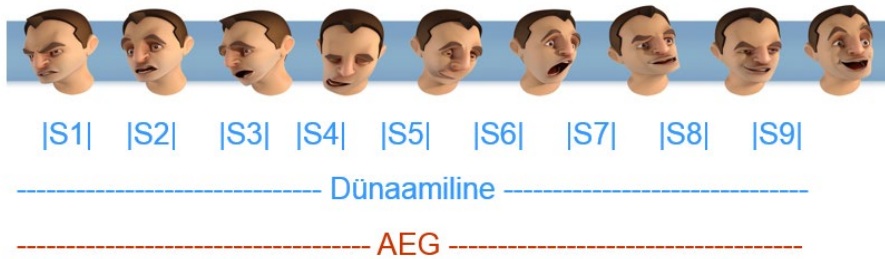
Statsionaarne (allikas: Ref #25).



Dünaamiline (allikas: Ref #26).

Kasutatakse näiteks siis, kui soovitakse hinnata: (a) vee kasutust üle aja; (b) teada mahutite veetasapindade muutust ajas või (c) järgida pumpade/klappide tööd aja lõikes. Võrdluseks võime tuua

pilt vs video. Video on järjestatud piltide jada, mis näitab millegi muutust ajas, samas saab sellest välja võtta ka üksiku hetke.



Allikas: Ref #27

S1, S2, ... - statsionaarne arvutushetk; S1 – S9 – dünaamiline arvutus.

Dünaamilise arvutuse kestvuseks on mistahes ajavahemik, tavaliselt 24h kordselt (1 ööpäev). Kestvusi nädal ja rohkem kasutatakse tavaliselt väikeste dünaamiliste ilmingute selgeks tegemiseks (mahuti veetasapinna langus, mis ööpäeva lõikes võib jääda märkamatuks). Mudelites on vaja määrata ka hüdrauliline ajasamm. See on ajasamm, mille jooksul vaadatakse ühte statsionaarset olekut. Tavaliselt on selleks 1 h. Vajadusel (mahutite veetasapindade ning sõlmedes olevate tarbimiste äkiline muutumine) võib seda vähendada, et saada täpsemaid tulemusi. Dünaamiline simulatsioon on võimeline välja tooma ka vahepealseid muutuseid, mis ei lange kokku hüdraulise ajasammu kordsega. Näiteks mahuti tühjenemine kahe valitud statsionaarse režiimi vahel. Sellistel puhkude esitavad enamik hüdraulilisi mudeleid täpse aja, millal probleem tekkis ning seejärel hüppavad järgmise fikseeritud ajasammu juurde või kuni järgmise vahesammu juurde. Kui muudatusi vahesammudena esineb liiga sageli, peaks vähendama hüdraulilise mudeli ajasammu.

```

Status Report
Page 1                               Fri Oct 10 14:32:25 2008
*****
*                                     E P A N E T                               *
*                                     Hydraulic and Water Quality                 *
*                                     Analysis for Pipe Networks                   *
*                                     Version 2.00.12                             *
*****

Analysis begun Fri Oct 10 14:32:25 2008

WARNING: Pump PUMP-1 open but exceeds maximum flow at 0:42:00 hrs.
WARNING: System unbalanced at 0:42:00 hrs.

WARNING: Pump PUMP-1 open but exceeds maximum flow at 2:00:00 hrs.
WARNING: System unbalanced at 2:00:00 hrs.

WARNING: Pump PUMP-1 open but exceeds maximum flow at 2:36:00 hrs.
WARNING: System unbalanced at 2:36:00 hrs.

WARNING: Pump PUMP-1 open but exceeds maximum flow at 9:48:00 hrs.
WARNING: System unbalanced at 9:48:00 hrs.

WARNING: Pump PUMP-1 open but exceeds maximum flow at 10:54:00 hrs.
WARNING: System unbalanced at 10:54:00 hrs.

```

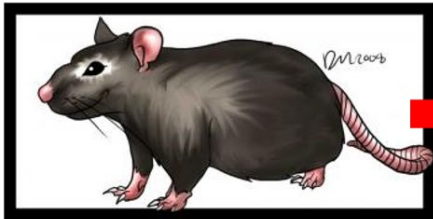
Joonis. Näiteks, vahesamm ajahetkel 0:42:00.

Teised simulatsiooni tüübid

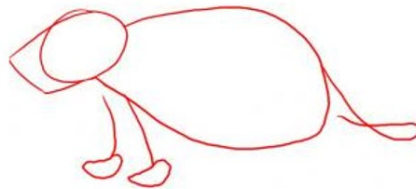
Lisaks hüdraulilisele simulatsioonile saab mudelitega teostada ka veekvaliteedi simulatsioone (keemiliste või bioloogiliste ainete leviku uurimiseks, veevanuse analüüs), automatiseeritud tulekahju veevarustuskindluse analüüse, maksumuse (energia tarbimise dünaamika) simulatsioone ning hüdraulilise löögi analüüse (pumba/klapi äkilisest seisundi muudatustest tingitud vooluhulga ning surve muutumine).

Skeletoniseerimine (mudeli lihtsustamine)

Skeletoniseerimine on protsess, kus hüdraulilise mudeli arvutamiseks võetakse arvesse vaid need mudeli osad, mis omavad olulist mõju süsteemi käitumisele. Iga mudeli osa (klapp, tarbija jne) arvestamine ei pruugi anda olulist erinevust tulemites – samas andmete maht on meeletu ning seega ka vigade tekkimisoht suurem. Skeletoniseerimise mõju analüüsi esmased katsed tehti *Eggener and Polkowski (1976)* ning *Shamir and Hamberg (1988a, 1988b)* poolt.



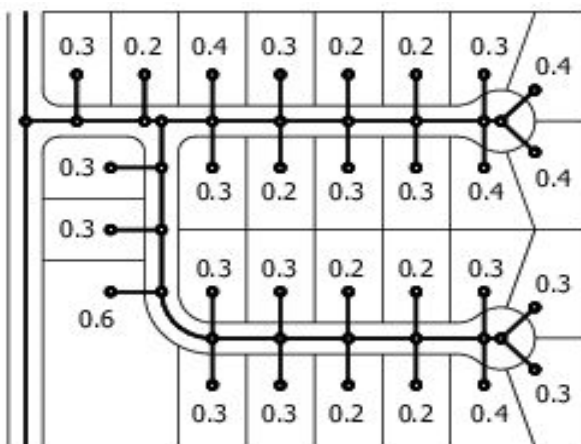
Allikas: Ref #28



Allikas: Ref #29

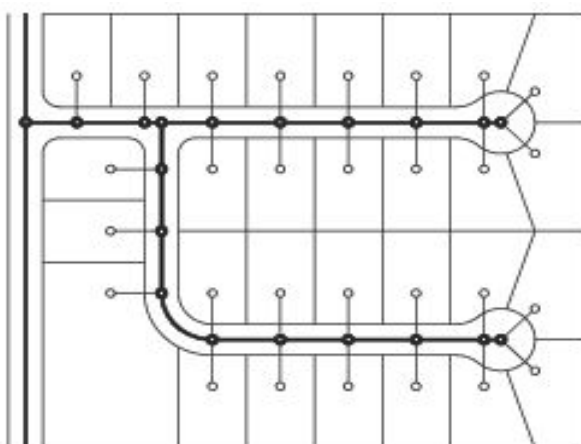
Oluline on siiski märkida, et skeletoniseeritud mudelist välja jäetud modelleerimata osad ei ole täielikult kõrvale jäetud; nende mõjusust on arvestatud lihtsustatud mudeli juures.

Skeletoniseerimise näide. Mudelis on iga tarbija jaoks omaette sõlm ning tarbimissõlm on omakorda liidetud peatoru külge lisasõlme kasutamisega.



Joonis. Sõlmede arv ca 50.

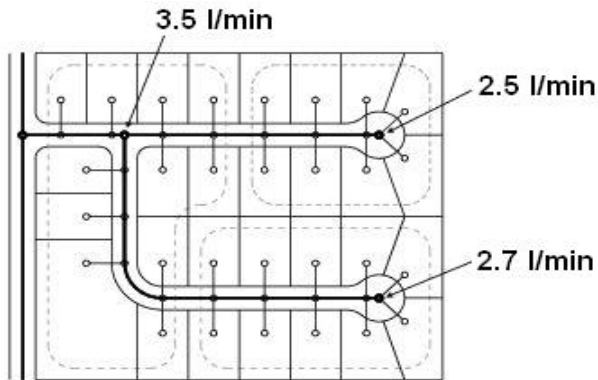
Sama jaotuskeemi võib aga modelleerida ka skeletoniseeritud kujul.



Sõlmede arv < 20.

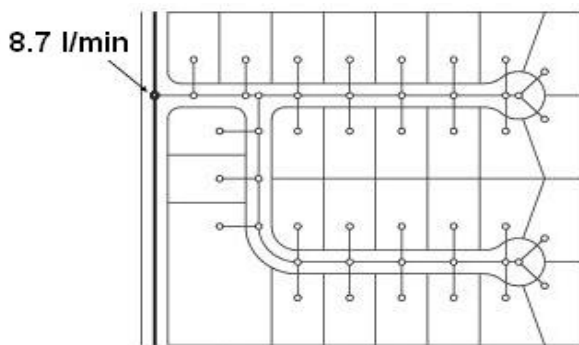
Pane tähele, et sellises järgus skeletoniseerimine ei võimalda vaadelda hüdraulilisi tulemusi tarbija torul – neid ei lisatud mudelisse. Seega kui ühendused pole olulise tähtsusega, on see mudel täiesti piisav.

Skeletoniseerimist saab jätkata – piirkonna koondamine ühte sõlme.



Tarbimiste koondamine sõlmedesse on siin väheke keerulisem – kuna kõikide tarbimislinkide jaoks ei jää alles sõlme. Lihtsaim viis on koondada tarbimised lähimasse sõlme. Kontuurjoonega on võetud kokku tarbimised, mis summeeritakse seejärel sõlme.

Skeletoniseerimist saab veelgi jätkata. Skeletoniseerimise järk sõltub mudeli kasutamise otstarbest.



Kui kasutatakse vaid ühte sõlme, siis pole võimalik vaadelda hüdraulilist olukorda sisepiirkonnas. Siit võib veel skeletoniseerimist jätkata, kus nimetatud tarbimine lisatakse omakorda lähimasse sõlme.

Iga veevõrgumudel on teatud määral skeletoniseeritud (lihtsustatud). Väikese läbimõõduga torusüsteemidele võib lihtsustatud mudel anda oluliselt erinevamaid survekadusid, kui täpsema mudeli juures. Linnavõrkude juures ei põhjusta tarbimiste summeerimine võrgu osa kaupa aga suuri muutusi. On neid, kes ütlevad, et üks võrk ei tohikski omada rohkem kui paarsada toru. On neid, kes ütlevad, et mudel (andmebaas) peab sisaldama absoluutselt igat ühendust, et selle täiendamine ning muutmine oleks kõigile jõukohane. Kui tegemist on lihtsustatud mudeliga – mitte keegi ei tea ju täpselt, mis andmeid tal puudu võib olla – võimatu on kogu infot sisse viia. Kui tegemist on täismahus mudeliga – siis saab lihtsustatud mudeli luua väljavõttena andmebaasidest.

Skeletoniseerimise aste sõltub kasutamise otstarbest. Näiteks energeetiline arvutus vajab minimaalset geomeetrilist detailsust. Samas kui hüdrantide vooluhulkade leidmine vajab suuremat täpsust. Üldplaneeringute tegemisel piirduakse jällegi väiksema täpsusega. Süsteemide detailse disaini juures vajatakse aga täpsemat mudelit. Vee kvaliteedi mudelid vajavad üldjuhul suuremat täpsust. See on modelleerija otsustada, millise täpsusega mudeli ta koostab, arvestades mudeli kasutusvaldkonda.

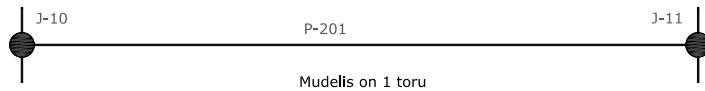
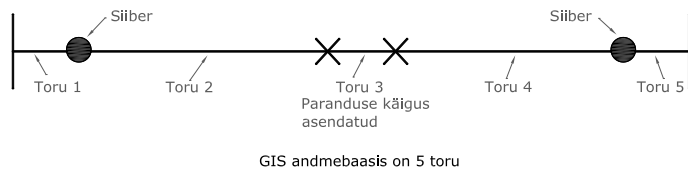
Iga element, mis mõjutab süsteemi tööd olulisel määral, peab jääma mudelisse alles. Nendeks on enamasti: (a) suurtarbijad; (b) mõõdetavad punktid; (c) kriitilised punktid, kus tingimused pole teada; (d) suure läbimõõduga torud; (e) torud, mis moodustavad olulisi ringistusi; (f) pumbad, kontroll-klapid, mahutid ja teised süsteemi tööd kontrollivad elemendid.

Elemendid, mille olulisus pole teada, peaksid jääma alles. Alati on võimalus järele proovida, kas mingil elemendil on mõju või mitte. Käivita mudel ja vaata järgi. Testida tuleb võimalikult erinevatel lähtetingimustel – kui tulemused ei muutu, saab öelda, et see element pole ka oluline. Tarkvara aitab nt väheolulisi torusid eemaldada.

Automatiseeritud skeletoniseerimine

Torude eemaldamine iseenesest ei ole keeruline. Komplitseeritum on olukord siis, kui on vaja tarbimisi (ja nendega seotud graafikuid), avade koefitsiente üle kanda. Veelgi keerulisem on kui soovitakse arvestada eemaldatavate torude hüdraulilise mahutavusega.

Mudelite loomiseks kasutatakse selle linkimist GIS andmebaasidega. Mida teha aga liigse infoga? Käsitsi eemaldada? Kasutada tarkvaralisi lahendusi?



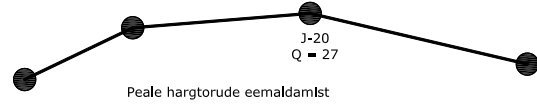
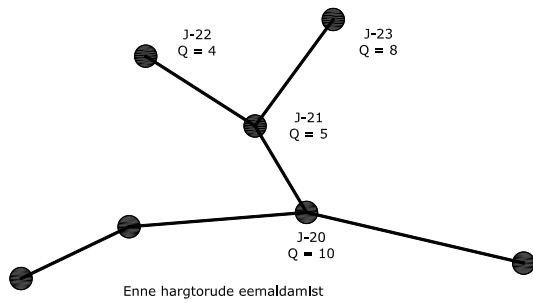
Skeletoniseerimine ei ole ühekordne tegevus, vaid koosneb mitmest madalamat järku eemaldamise protsessist, et kindlustada tarbimiste loogiline kooskõla lähtepunktiga.

Lihtne torude eemaldamine

Torude eemaldamine nende läbimõõdu või mõne muu kriteeriumi põhjal. Omab suurt tähtsust kui tehakse väljavõtteid GIS andmebaasidest. Üldjuhul ei arvestata nende mõjusust tarbimiste lõikes ega ka hüdraulilise mahutavuse säilimist. Kasutatakse enamjaolt enne tarbimiste lisamist. Automatiseeritud skeletoniseerimist sisaldavad modelleerimispaketid sisaldavad sellist liiki lihtsustust alati.

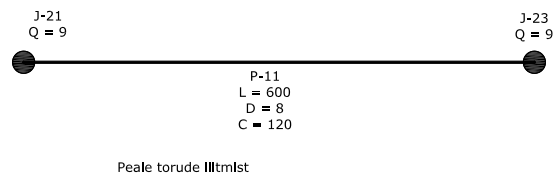
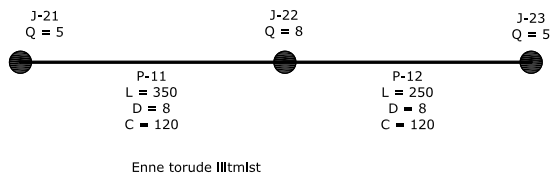
Hargtorude eemaldamine (branch trimming & branch collapsing)

Seadistatavad parameetrid: kärpimiste aste/arv. Juhul kui tupiktorud eemaldada (ja nende lõpus ei ole mahuteid), siis neil ei ole mitte mingit efekti süsteemi mahutavuse jäävuse koha pealt.



Torude liitmine (pipe merging) ($D, C = \text{const}$)

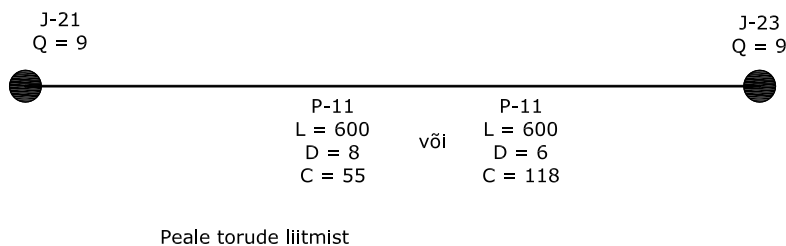
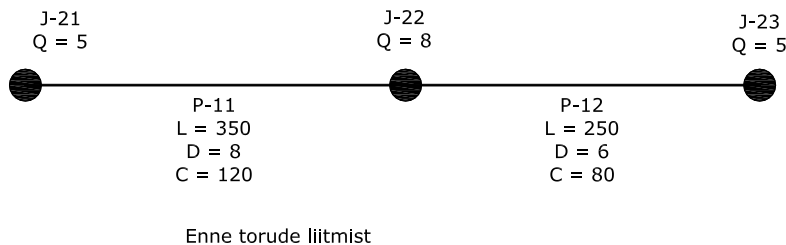
Seadistatavad parameetrid: tarbimise ülekandmise proportsioonid. Tavaliselt on tegu väga väikest mõju esile kutsuva tehnikaga. Kui on suurtarbija, siis tuleks jätta lõigud alles – saab seada piirangud: kui tarbimise väärtus ületab teatud piirväärtuse, siis jäetakse see sõlm rahule. Operatsiooni on lihtne läbi viia, kui $D = \text{const}$ ning $C = \text{const}$.



Aga mida teha siis, kui D ja C pole võrdsed?

Torude liitmine ($D, C \neq \text{const}$)

Lõpmatu arv D ja C kombinatsioone. Võimalus 1: vali ühe toru D ja C lõpptoru parameetriteks.



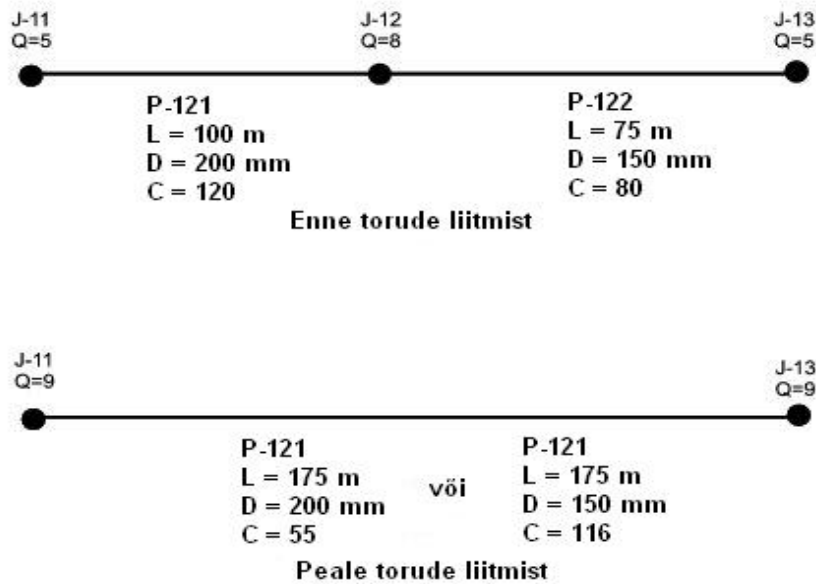
Võimalus 2: vali üks lõpptoru parameetritest (D või C) ning arvuta teine parameeter. Vali üks lõpptoru parameetritest (D või C) ning arvuta teine parameeter:

$$C_r = \left(\frac{L_r}{D_r^{4.87}} \right)^{0.54} \left(\sum_i \frac{L_i}{D_i^{4.87} C_i^{1.85}} \right)^{-0.54}$$

kus: L – pikkus (m); D – diameeter (m); C – Hazen-Williams'i C -faktor; r – tähistab lõpp-toru parameetrit; i – tähistab i -ndat kombineeritavat toru.

Pane tähele, et D-W valemi korral on esitus märksa keerulisem.

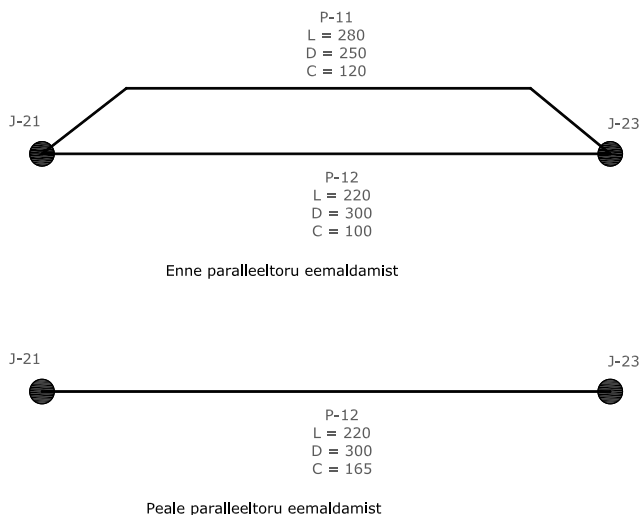
Peale liitmist võib torule lisada ka summaarse kohtsurvekao teguri ning kontrollklapid.



Paralleelsete torude eemaldamine

Anneme ette D (läbimõõdu), leiame C :

$$C_r = \frac{L_r^{0.54}}{D_r^{2.63}} \sum_i \frac{C_i D_i^{2.63}}{L_i^{0.54}}$$

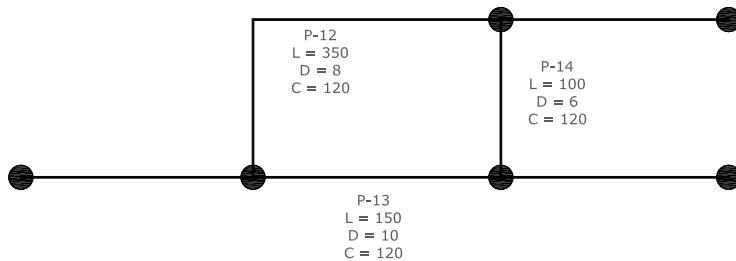


Läbimõõduks jääb alles jääva toru läbimõõt. Peale toru eemaldamist saab arvestada ka kohtsurvekao teguritega ning klappidega. Lihtsam on see siis, kui mõlemad torud omavad kontrollklappi – siis ka lõpp-torul jääb see alles. Täpset väärtust on rakse määrata – samas keskmise väärtuse lisamine ei põhjusta suuri vigasid.

Torude eemaldamine, ringistuste katkestamisega

Oluliselt suuremat kaalu lihtsustus. Eelnevatel sammudel kirjeldatud lihtsustused ei mõjuta veevõrgu tööd nii suurel määral. Selleks peab hakkama lõhkuma ringistusi. Meeles peab aga pidama, et mitte alati ei pruugi ringi lõhkumine olla kõige parem just väikseima mõjususega torust. Ja mõnel juhul tuleb selline toru ka alles jätta. Üldjuhul peab seega esmalt määrama toru, mis on väiksema mõjususega vastavas ringis:

$$\frac{CD^{2.63}}{L^{0.54}}$$



Kokkuvõte peamistest skeletoniseerimise viisidest

Kolme esimese variandi juures ei muutu survekadu ega ka mahtuvus. Neljanda variandi juures sõltub süsteemi mahtuvuse muutus aga toru valikust.

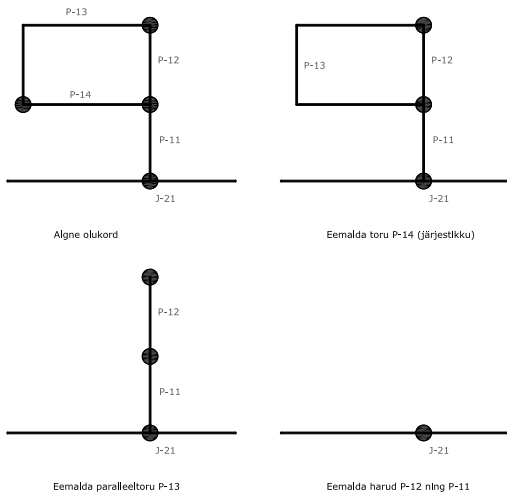
Tegevus	Mõjususe sõlmele?	Süsteemi mahtuvuse muutumine?
Harutoru eemaldamine	Eemaldab sõlme	Ei
Torude liitmine	Eemaldab sõlme	Ei
Paralleeltoru eemaldamine	Sõlmi ei eemaldata	Ei
Ringistuses oleva toru eemaldamine	Sõlmi ei eemaldata	Jah

Mitte-toru-elementide eemaldamine

Alati tuleb arvestada eemaldatava elemendi mõjususega. Tarbimiste ülekandmisel ei saa need läbida pumпасid/klappe. Pumпасid/klappe saab äralõigatavates harudes asendada väljavooludega. Pumпасid/klappe võib eemaldada süsteemist vaid juhul, kui nende mõjususe on täielikult teada – tavaliselt see nii aga pole. Kui liidetaval torul on klapp/siiber, peab selle lisama ka lõpp-torule. Mahuteid peetakse üldjuhul väga tähtsateks elementideks ning neid ega nendega seotud torusid ei tohi eemaldada süsteemist.

Keerukamad skeletoniseerimised

Skeletoniseerimine on järk-järguline protsess. Alustatakse lihtsamatest (väiksema mõjususega) ning lõpetatakse ringistuste lõhkumisega. Automatiseeritud skeletoniseerimine nõuab arvutitelt teatud lisaressurssi.



Eelneval pildil võib näha, et tegemist on haruga ja kohe võiks sõlmedes olevad tarbimised liita punkti J-10. Samas arvuti peab seda tegema samm-samm haaval.

Skeletoniseerimise lõpetamise kriteeriumid

Iga skeletoniseerimisega on põhimõtteliselt võimalik jõuda lahendini, kus on ainult mõned torud, pump, mahuti, üksikud sõlmed. Samas ei suuda selline lihtsustatud mudel anda tõepärast infot reaalse võrgu kohta. Defineeritakse kriteeriumid, mis peatavad edasise skeletoniseerimise. Näiteks torude läbimõõtude piirang, millest alates skeletoniseerimine lõpetab või teatud tarbimiste alammäär, millest edasi sõlmi ei koondata.

Mudeli hooldamine

Peale mudeli loomist tuleb selle vastavust reaalsele olukorrale kontrollida pidevalt. Võib esineda torusid, mis on märgitud kui: installeeritud, projekteerimisel või disainimisel, installeeritakse tulevikus või ei installeerita üldse. Mudeli seisukohalt pole vaja jätta alles elemente, mis on eemaldatud reaalsest kasutusest. Teiselt poolt võib esineda ka ajalisi lahknevusi installeeritud toru ja selle eemaldamise/lisamise osas GIS-i süsteemi. Modelleerija vaatepunktist peaks kasutama mitut erinevat mudelit – nn peamudelit ja mudeleid, milles toimetatakse muudatusi enne lõpp-varianti kopeerimist.

Referentsid

Pildimaterjal

- Ref #01 Morris, John H. Black, Garner State Park - Base Map - SP.42.3, <http://www.flickr.com/photos/texasstatearchives/6468161689/>
- Ref #02 Donald W. Woodard, Digitize the final map, <http://water.usgs.gov/nwsum/WSP2425/mapping.html>
- Ref #03 Mick Knapton, Haweswater from Harter Fell, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Haweswater_from_Harter_Fell_3.jpg
- Ref #04 Ethan Miller/Getty Images, Lake Mead Goes Dry, <http://news.nationalgeographic.com/news/2007/08/photogalleries/wip-week40/photo4.html>
- Ref #05 Tone, Ladybower Reservoir, <http://www.flickr.com/photos/tonymangan/754511201/>
- Ref #06 Bjoertvedt, Lake Ülemiste, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:%C3%9Clemiste.jpg>
- Ref #07 Squaw Valley Reservoir, <http://www.tecreno.com/water/index.htm>
- Ref #08 Water Storage Tank Allardt (Tennessee), <http://www.jchengr.com/P7080103.jpg>
- Ref #09 Water Storage Tank Pleasant View Utility District Pleasant View (Tennessee), http://www.jchengr.com/Pleasant%20View%20Water%20Tank%20008_small.jpg
- Ref #10 Debbie Rogers, Belton standpipe, <http://www.beltonsc.com/stanpipe374.jpg>
- Ref #11 Paul Folmsbee, Municipal standpipe, <http://www.panoramio.com/photo/16457016>
- Ref #12 Cesar Saenz, Water tank (Arlington, TX), <http://www.panoramio.com/photo/49217503>
- Ref #13 StevenM_61, Church and Water Tank (North Richland Hills), http://www.flickr.com/photos/stevenm_61/2928060898/
- Ref #14 <http://ddoe.dc.gov/service/underground-storage-tanks-ust-and-lust>
- Ref #15 Water tank at Jaigarh fort, http://www.go2india.in/g_view_gal.php?id=1967
- Ref #16 The Electrochemical Reaction, <http://water.me.vccs.edu/courses/env110/clipart/pipewall2.gif>
- Ref #17 http://www.wuc.on.ca/images/pic.rusted_pipe.jpg
- Ref #18 Fantagu, Centrifugal Pump, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Centrifugal_Pump.png
- Ref #19 Coulson and Richardson, Characteristic curves for centrifugal pumps, <http://www.nzfst.org.nz/unitoperations/unopsassets/fig4-4.gif>
- Ref #20 Neurotronix, Check valve, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Check_valve_2.jpg
- Ref #21 HS, Gate Valve, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:6-Moly-Gate_Valve--The-Alloy-Valve-Stockist.jpg
- Ref #22 HS, Butterfly valve, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Butterfly-valve--The-Alloy-Valve-Stockist.jpg>
- Ref #23 Val-Matic, Air release valve, http://www.valmatic.com/brochures/Air_1500.pdf
- Ref #24 Val-Matic, Vacuum breaker valve with air release, http://www.valmatic.com/brochures/Air_1500.pdf
- Ref #25 Tanya Puntti, Showing motion in flying bird photographs, <http://www.slrphotographyguide.com/images/bird-slowlshutter.jpg>
- Ref #26 Tanya Puntti, Flying Seagull, <http://www.slrphotographyguide.com/images/bird-flying.jpg>
- Ref #27 Liron Topaz, Expressions, http://lirontopaz.com/blog/Liron_BlendTest.jpg
- Ref #28 Dawn, Drawing a rat (final), <http://www.dragoart.com/tuts/pics/5/789/how-to-draw-a-rat-tutorial-drawing.jpg>
- Ref #29 Dawn, Drawing a rat (first step), <http://www.dragoart.com/tuts/pics/8/789/how-to-draw-a-rat.jpg>

Artiklid

Eggener, C. L., and Polkowski, L. (1976). "Network Modeling and the Impact of Modeling Assumptions. Journal of the American Water Works Association, 68(4), 189.

Shamir, U. and Hamberg, D. (1988a). "Schematic Models for Distribution Systems Design I: Combination Concept." Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 114(2), 129.

Shamir, U. and Hamberg, D. (1988b). "Schematic Models for Distribution Systems Design II: Continuum Approach." Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 114(2), 141.

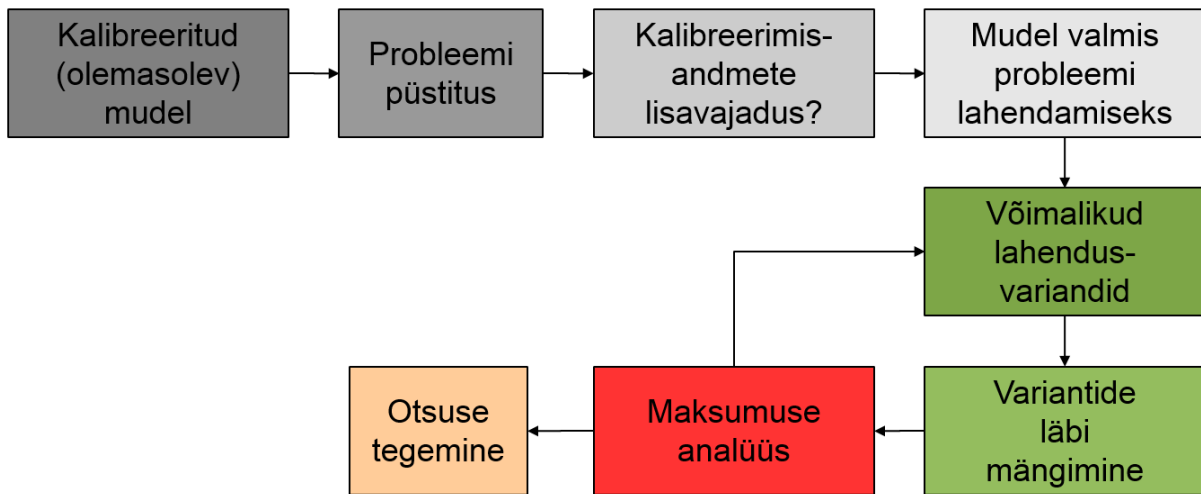
Mudelite kasutamine veevõrkude projekteerimisel

Sissejuhatus

Veevõrkusid on ehitatud ka enne hüdrauliliste mudelite kättesaadavust. Seega võib tekkida küsimus, miks viimastel aastakümnetel on arvutitel teostatavatest simulatsioonidest saanud standardtegevus veevõrgu disainiprotsessi juures? Mudelid võimaldavad läbi mängida erinevaid olukordi ning vähendada rutiinseid tegevusi. Arvutimudeleid saab kasutada märksa keerukamate probleemide lahendamiseks, kui seda käsitsi oleks võimalik teha. Samas on ka puuduseid, nagu tarkvara maksumus, andmetöötluse hind, tööjõu koolitus. Üldiselt võib öelda, et mudeli koostamiseks tehtud kulutused tasuvad ära pikemas perspektiivis. Mudeli uuendamine on odavam kui selle uuesti tegemine.

Mudelite rakendamine projekteerimisel

Siiani oleme vaadanud mudelite koostamist ning kalibreerimist nüüd vaatame nende kasutamist. Mudelite rakendamine projekteerimises põhineb kalibreeritud mudelil.



Kalibreerimine ning lihtsustamine

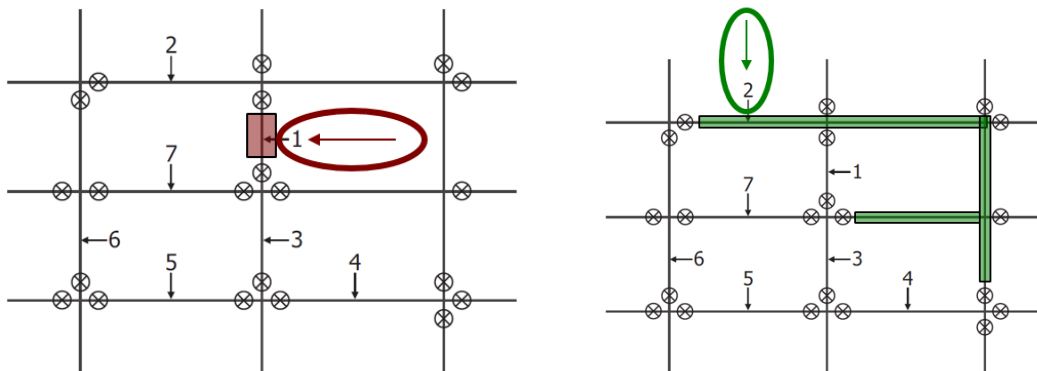
Sõltuvalt probleemi keerukusest tuleb kasutada ka sobivat mudelit. Ei tohi unustada, et kõiki mudelite järke (lihtsustusi) tuleb uuendada.

Disain vooluhulk

Üldjuhul kasutatakse selleks max tunni vooluhulka (tuleviku väljavaadetega). Kõik tuleviku vaatamised on ennustused, seega eksisteerivad teatud ebamäärasused. Kui üledimensioneeritud torud (piirkonnad) kannatavad ennekõike veekvaliteedi all, siis aladimensioneeritud torud ei taga piisavat vooluhulka tarbijale ja seega tuleb tulevikus kaasata näiteks paralleelkorustik. Lisaks disainvooluhulgale, testi ka teistele režiimidele (nt kesk. päev).

Usaldatavus

Mudeli koostamiseks tehtud kulutused tasuvad ära pikemas perspektiivis. Mudeli uuendamine on odavam kui selle uuesti tegemine. Usaldatavust võib defineerida väga erinevat moodi. Üks võimalus on teha toru(stiku) väljalangemise analüüs. Mitu tarbijat jääb veeta kui mingi toru puruneb (vajab rekonstrueerimist)?



Disain läbi mudeli – rollid

Üldjuhul on nii modelleerija kui ka disainer ühes isikus – samas veevõrgu opereerija ei tegele üldjuhul mudeliga, selleks on ikkagi omaette (kui on) planeerimis- ja/või modelleerimisosakond. Disain läbi mudeli on “lõputute” variantide läbi mängimine arvutimudeliga ning tähendab ka diskussiooni teiste töötajatega/tellijaga.

Mudeli rakendused

- Ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni arendamise kava (*master planning*) – ettevaatamisega 20 – 40 aastat, kõrgemat järku skeletoniseeritud mudelid, pumba modelleerimine konstantsel surve (reservuaar)
- Eelprojekt (*preliminary design*) – Vaadatakse mingit kitsamat piirkonda, kasutada pumba tegelikke graafikuid, mudel peab olema kalibreeritud kuni projekteeritava piirkonnani.
- Alampiirkonna rajamine (*subdivision layout*) – olemasoleva veevõrgu ühenduspunkti mõõtmisandmete vajalikkus, rajatava piirkonna torustike põhiskeem, muus osas võib kasutada skeletoniseeritud mudelit. Oluliseim disaini argument on tulekustutusvee kättesaadavus ja selle lahendamine (perspektiiviga kuni 5 aastat).
- Rekonstruktsioon (*rehabilitation*) – Tulekustutusvesi, lahenduste otstarbekuse analüüs, vajalik käsitletava piirkonna detailsus, muus osas skeletoniseeritud.

Toru dimensioneerimine

Dimensioneerimine võib lähtuda: (a) minimaalne läbimõõt (nt tulekustutusvee tagamise seisukohast); (b) maksimaalne läbimõõt (veekvaliteet); (c) toru materjal (teatud läbimõõdust alates on otstarbekam nt plasti asemel eelistada malmi). Üldine reegel on võrrelda maksumust minimaalse vajatava survega.

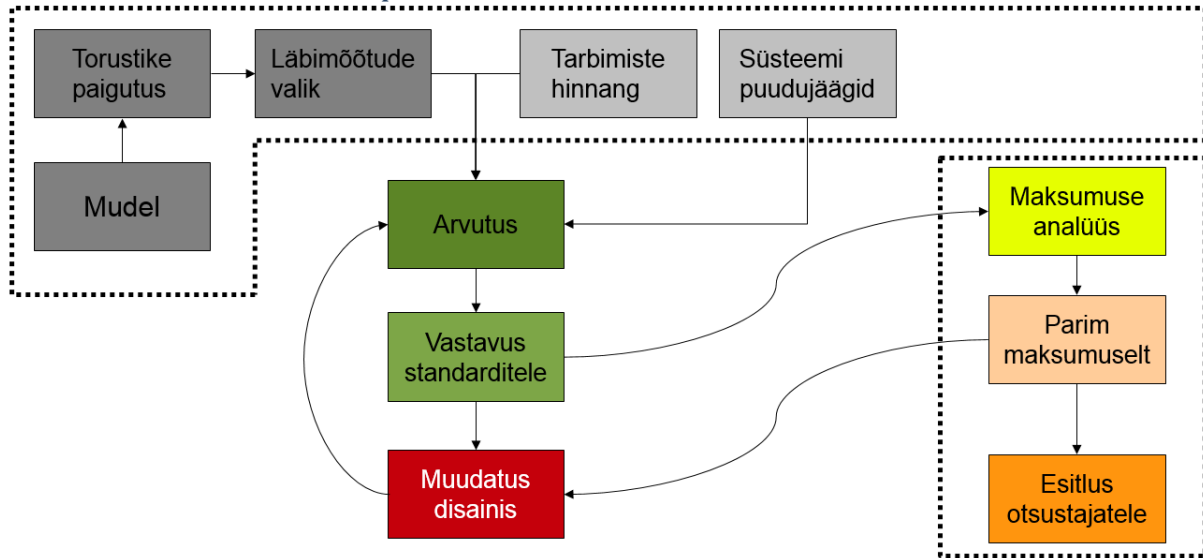
Uute torude lisamiseks võib kasutada ka valemit:

$$D = \sqrt{\frac{1274 \cdot Q}{v_{max}}},$$

kus: D – esialgse läbimõõdu hinnang (mm); Q – max vooluhulk (l/s); v_{max} – maksimaalne lubatav voolukiirus (m/s).

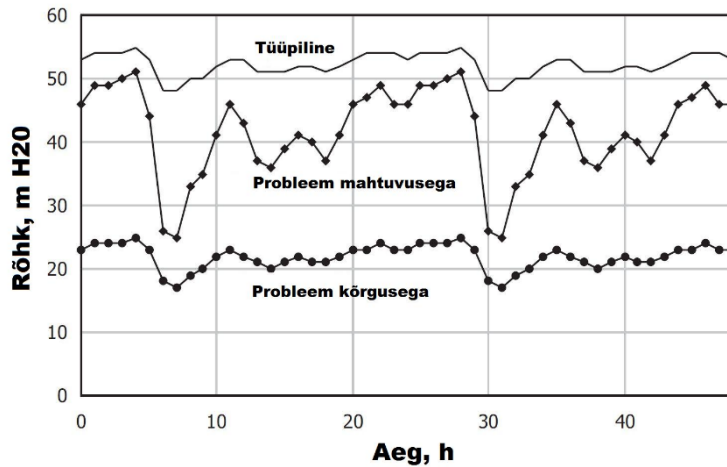
Mudel tuleb käivitada erinevatele olukordadele ning anda hinnang järgmistest vaatepunktidest: (a) max kiirused; (b) minimaalsed surved; (c) pump ei tööta ettenähtud piirkonnas; (d) mahutid ei tühjene/täitu vajalikus mahus; (e) kõrged surved; (f) liiga väikesed kiirused tipptarbimisel; (g) probleemid veekvaliteediga (vähene kontsentratsioon).

Torude dimensioneerimise protsess



Veevarustussüsteemi probleemide lahendamine

Regulatsioonid ei ütle, mismoodi saab probleemi algeteni jõuda. Mudelitega on võimalik siiski probleemi algeteni jõuda.



Aladimensioneeritud torud

Neid ei ole lihtne leida. Tulekahju olukorra analüüs võiks viidata sellelaadsetele probleemidele. Hinnang läbi voolukiiruste. Ei ole otseselt kirjas maksimaalset voolukiirust (vaid vahemik), samas, kui kiirused lähenevad 3 m/s, siis avaldab see olulist mõju näiteks hüdraulilisele löögile. Ka kiirused 1 m/s võivad kaasa tuua olulisi survekadusid kui on tegemist suurte võrkudega (km).

Ebapiisav pumpamine

Pumpamise energia kasutatakse enamjaolt ära rõhu tõstmiseks (ning mitte survekadude ületamiseks). Võib ilmned ka süsteemides, kus mahuteid ei eksisteeri või on need probleemsest kohast liiga kaugel. Probleemi allikad jagunevad: (a) aladimensioneeritud toru(d); (b) läbimõõdu muutus ei pruugi probleemi aga lahendada; (c) suure mahtuvusega süsteemides ei ole kerge lahendust leida; (d) pumbajaama pumbad peavad tagama disainvooluhulga ka juhul kui üks neist on rivist väljas.

Püsivalt madal rõhk

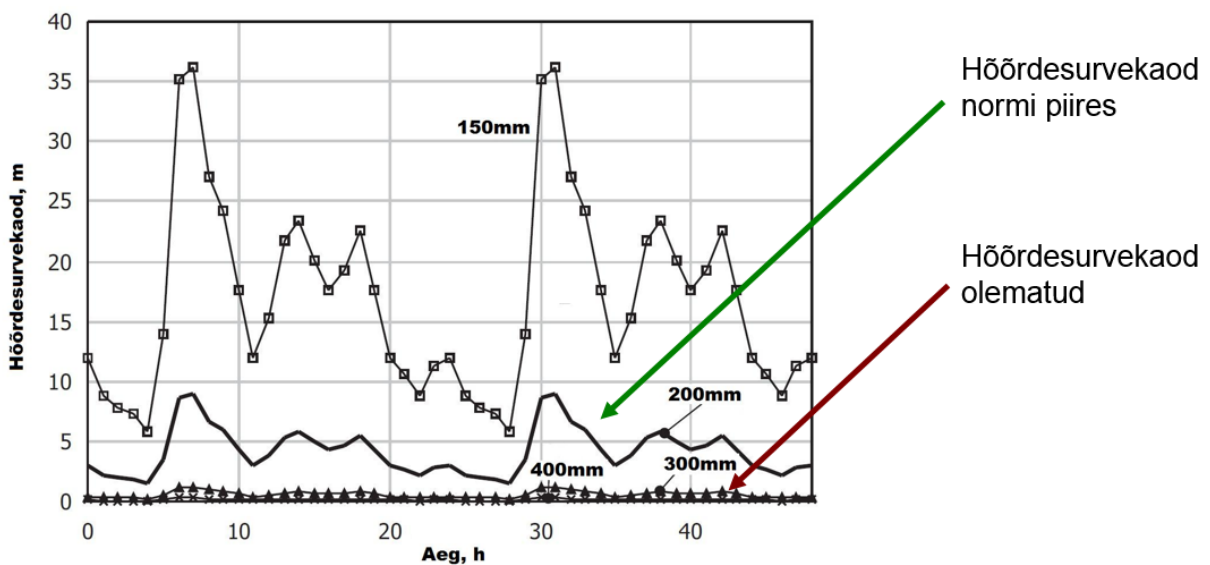
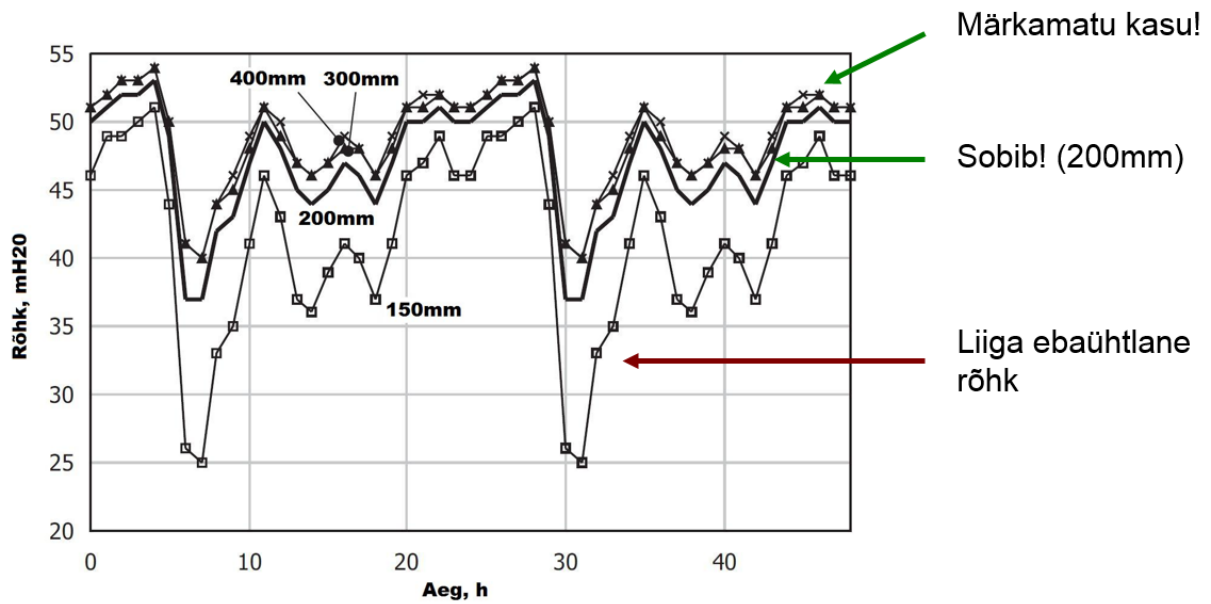
Kas tarbijad asuvad oluliselt kõrgema reljeefi piirkonnas? Pumba tõstekõrguse muutmine (nt pöörete arvu reguleerimine). Survetsoonide nihutamine. Optimaalne survetsoonide vahe on 30 mH₂O. Alla 15 mH₂O võiks viidata liiga ohtrale survetsoonide kasutamisele. Üle 45 mH₂O erinevus võib aga viia liig kõrgete surveteni madalama reljeefi piirkonnas.

Suured rõhud madala tarbimise perioodil

Kas tarbijad asuvad oluliselt madalama reljeefi piirkonnas? Survealandusklapid võivad reguleerida max rõhku süsteemis. Maksimaalne soovitatav rõhk süsteemis ei tohiks olla suurem kui 50 – 60 mH₂O. Tegelik torude vastupanuvõime (katsetamine) on märksa suurem. Soovitatav kontrollida 40 – 60% keskmise päevase tarbimise režiimis. Kontrollima peaks ka pumba tegelikku töörežiimi (et ei töötaks ettenähtud vooluhulgast madalama vooluhulga piirkonnas). Lahenduseks oleks ka rõhku väljalaskva klapi kasutamine ning pumba pöörete reguleerimine.

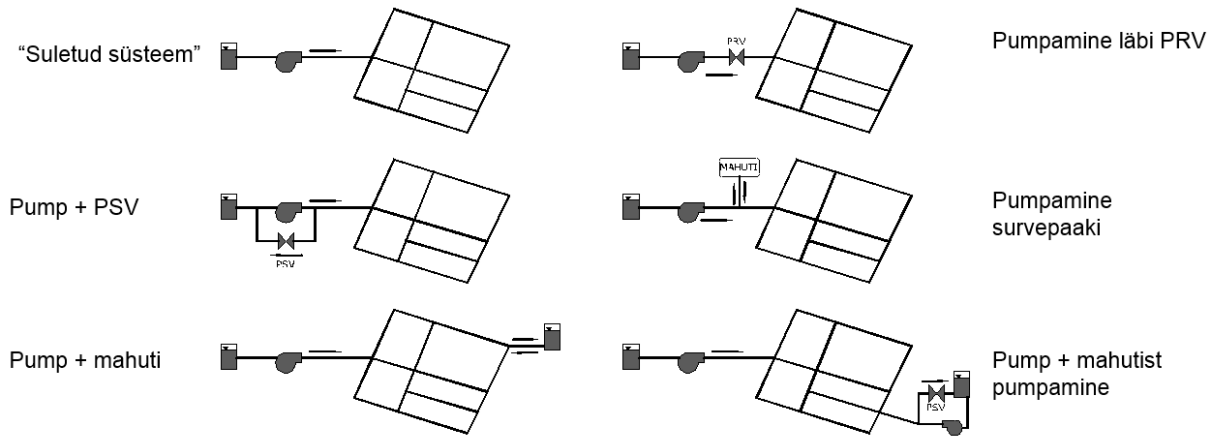
Üledimensioneeritud torud

Raske kontrollida, sest süsteem töötab normaalselt. Samas on tegemist energia ülekuluga ning tõenäoliselt esineb probleeme ka veekvaliteediga. Lahenduseks oleks läbimõõdu vähendamine, kuid vii läbi kontrollarvutus (max tund või tulekahju olukord).

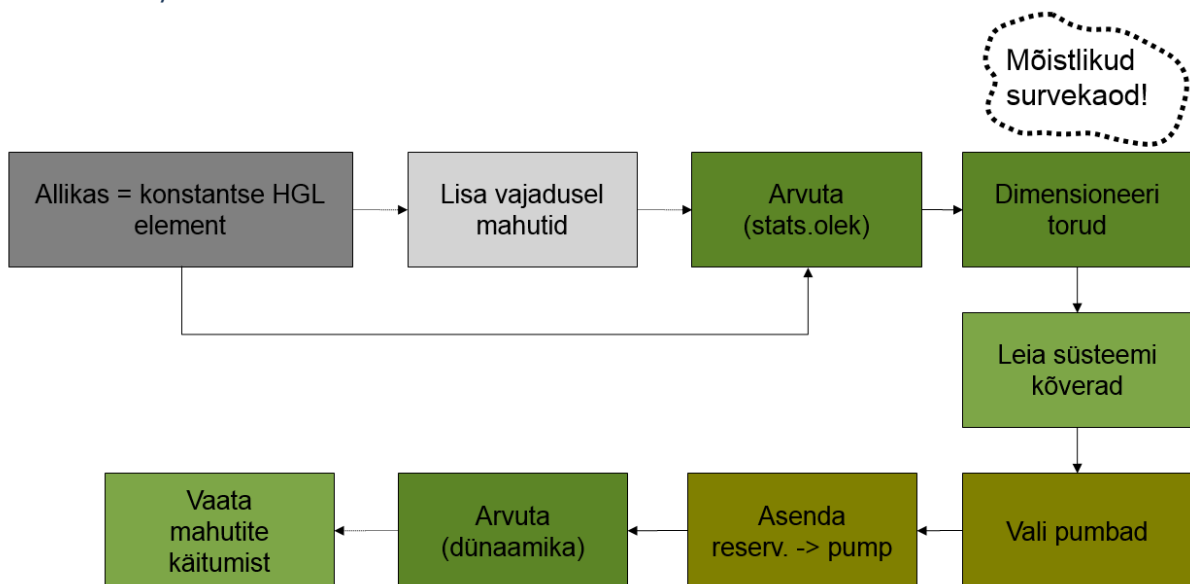


Pumpamise analüüs

Pumpamise skeemid

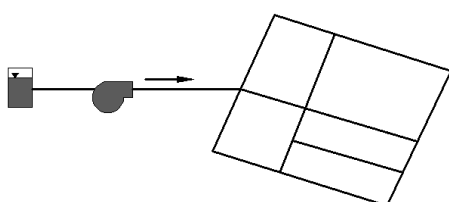


Pumba valik/disain



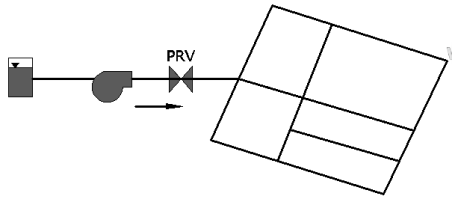
Suletud süsteem

Lihtsaim viis (konstantse kiirusega pump). Väikesed kapitali kulud aga suured jooksvad kulud. Peamiseks puuduseks on aga efektiivsus on. Näiteks pump, mis töötab tipptarbimisel efektiivselt, võib öisel tunnil töötada 30-50% efektiivsusega (tuleks kasutada mitut pumpa). Probleemiks võivad olla ka liiga kõrge või madal rõhk süsteemis. Pump tuleb valida max tõstekõrguse piirkonna läheduses (pumbagraafikul efektiivseim punkt).

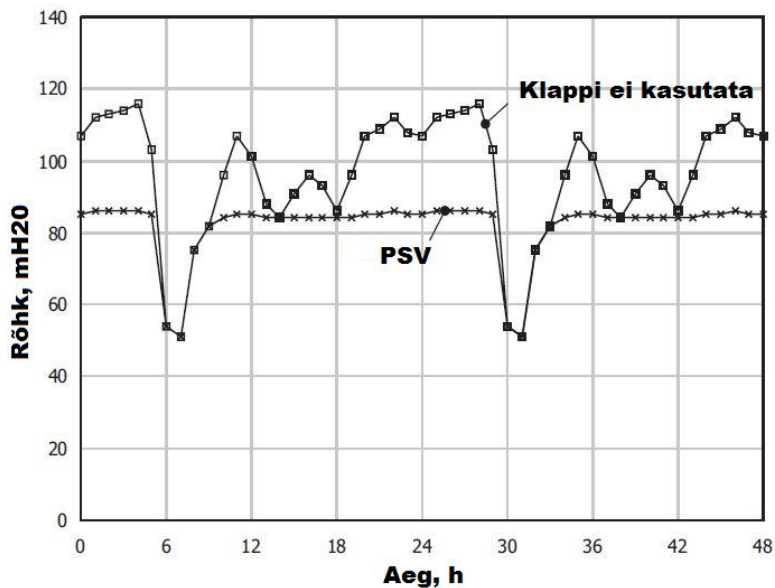
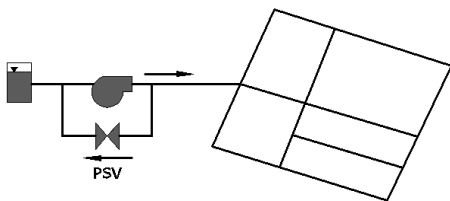


Pumpamine läbi PRV / PSV

Vajadus PRV (*pressure reducing valve*) järele. Süsteemis liiga kõrged surved tipptarbimisest väljapool. Samas on see kulukas.



Vajadus PSV (*pressure sustaining valve*) järele. Rõhu alandamine imitoru poolses otsas. Efektivsem kui PRV (nt 150mm PRV vs 50mm PSV; 100/150mm toru; Q = 30 l/s). PSV avatud vaid madalamatel vooluhulkadel, et tekitada lisasurvekadusid.



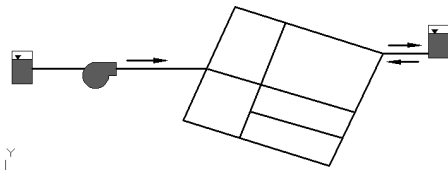
Pumpamine läbi pumba pöörete reguleerimise

Kasutatakse nn *suletud süsteemides*, et saada efektiivsem survejaotus üle ööpäeva. Modelleerimises tuleb ette anda pöörete arvu graafik. Rõhu ette andmine mingis süsteemi punktis, mida peab pump hoidma. Seda on keerukam kasutada, sest lahendada tuleb kahte sorti võrrandeid: (a) võrrandid, mis kirjeldavad pumba tööd täispöoretel; (b) võrrandid, mis kirjeldavad pumba tööd madalamatel pööretel. Eesmärgiks on saada max vooluhulk ilma märkimisväärse surve alanemiseta.

Pumpamine mahutiga süsteemi

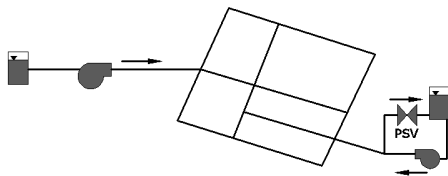
Tegemist on üldjuhul efektiivseima lahendusega. Saab kasutada konstantse pöörete arvuga pumpa (kuid ei pea). Modelleerimine tuleks läbi viia vähemalt 2 ööpäeva (EPS) ulatuses, et analüüsida mahuti sobivust (vajadusel ümber disainida, vahetada asukohta, lisada teine jne mahuti). Mahuti veetase

peaks taastuma peale paaripäevalist eriolukorralist tööperioodi. Mitme mahuti modelleerimine on keerukas, sest me peame tagama samal ajal mõlema mahuti täitumise ja tühjenemise samaaegselt. See võib osutada aga keerukaks.



Pumpamine mahutiga süsteemi ja mahutist süsteemi

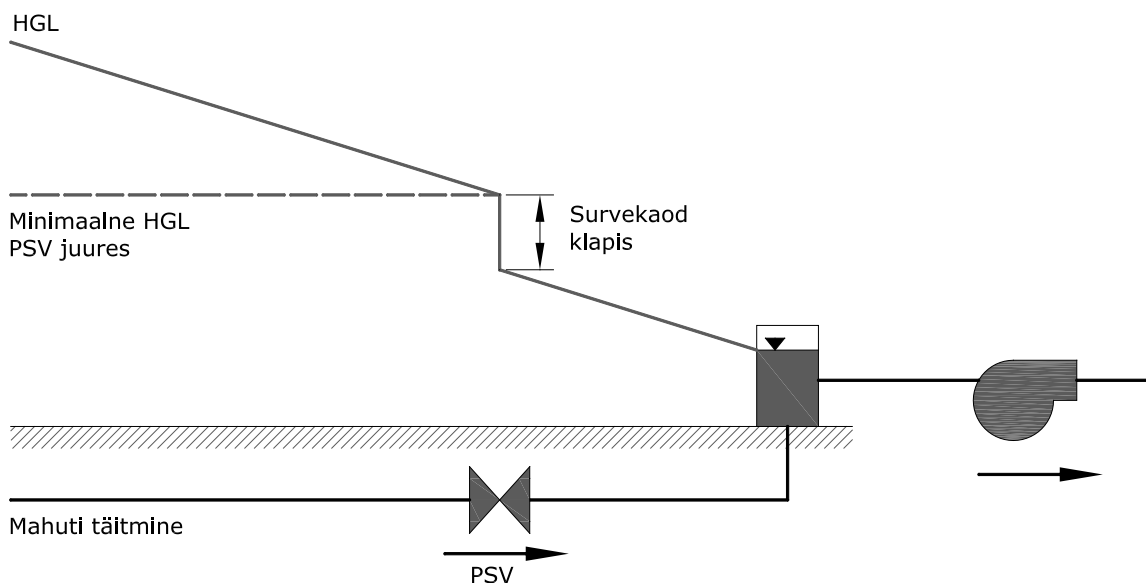
Eelised on, et mahuti saab ära peita (maa-alused). Mahuti ehitus üldjuhul odavam. Puuduseks on aga, et energiat vajatakse nii mahutisse pumpamiseks kui sealt süsteemi viimiseks. Kuna mahutist süsteemi vajatakse pumpa, siis peab olema tagatud pumpamine ka näiteks elektrikatkestuse korral (lisakulu). Mahuti täitmine on energaetiliselt ebaefektiivne, sest süsteemi *HGL* on alati suurem kui mahuti veetase. Pumpade koostööst tekkivad ebaefektiivsed pumpamisrežiimid.



Modelleerimine on keerukas, sest tegemist on mitme erineva pumpamise režiimiga.

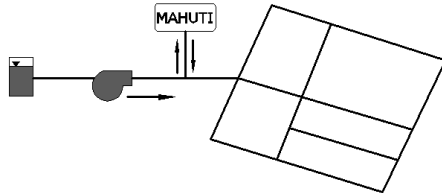
Variant	Lähtepump	Mahuti pump (VSP)	Märkused
1	Töötab	Töötab	Tipptarbimine
2	Ei tööta	Töötab	Mahutist tarbimine
3	Töötab	Ei tööta	Mahuti täitmine
4	Töötab	Ei tööta	Mahuti täis või süsteemist lahti ühendatud
5	Ei tööta	Ei tööta	Alternatiivne allikas

Mahuti täitumiskiirust saab kontrollida PSV lisamisega.



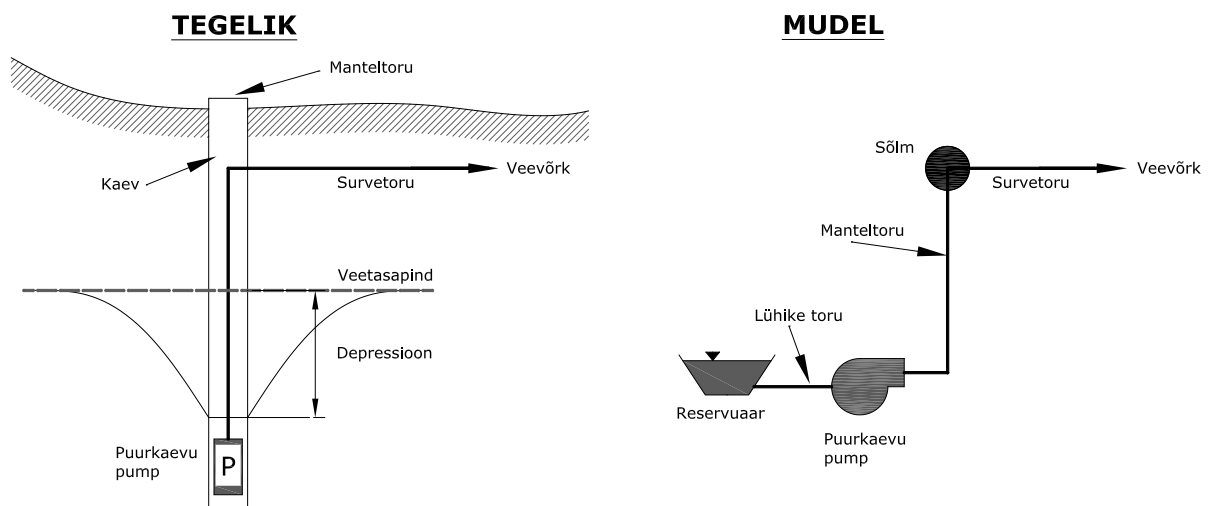
Pumpamine survepaaki (mahutisse)

Eeliseks on, et *HGL* joont saab hoida kontrolli all ilma mahuti tõstmiseta. Lisaks annab selline lahendus ka kaitse hüdraulilise löögi vastu (stabiilsem nn rõhu kõikumine). Puudusteks on, et see lahendus on oluliselt kallim kui *PRV* (või sagedusmuunduriga pump) ning seda kasutatakse väiksemate süsteemide korral kui tulekustutusvett samast süsteemist ei võeta. Modelleerimine tähendab max ning min õhu (gaasi) koguste arvutamist mahutis (disain).

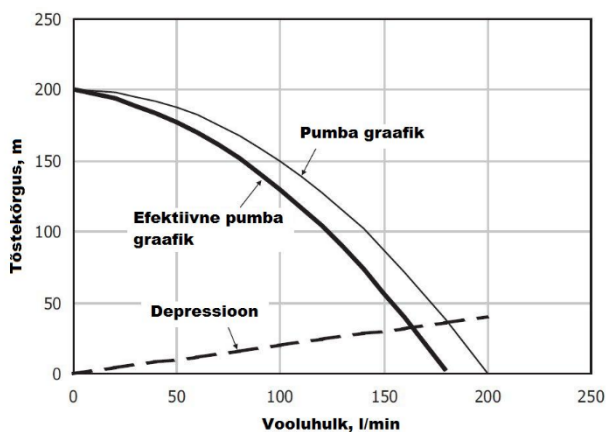


Pumpamine puurkaevust

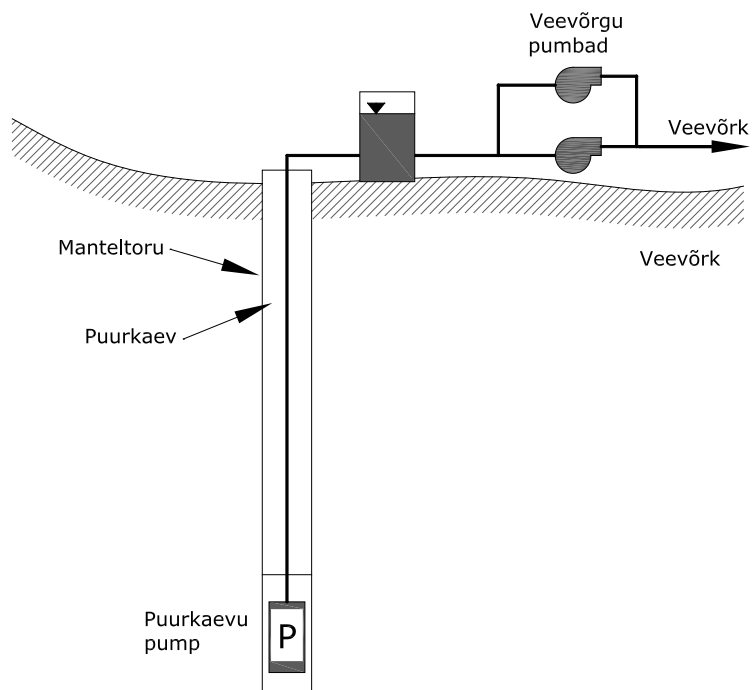
Üldiselt kehtivad samad reeglid, mis juba käsitletud pumpamise režiimidel. Kuna puurkaevu veetasapind maapinna suhtes (veepeegel) muutub, siis tuleb seda arvestada ka pumba valikul. Enamik puurkaevufirmasid teevad proovimõõtmisi. Tuleb tagada pumba häireteta töö kõikide võimalike (tulenevalt hooajalisusest) veetasapindade juures. Veepeegli alanemist on võimalik modelleerida.



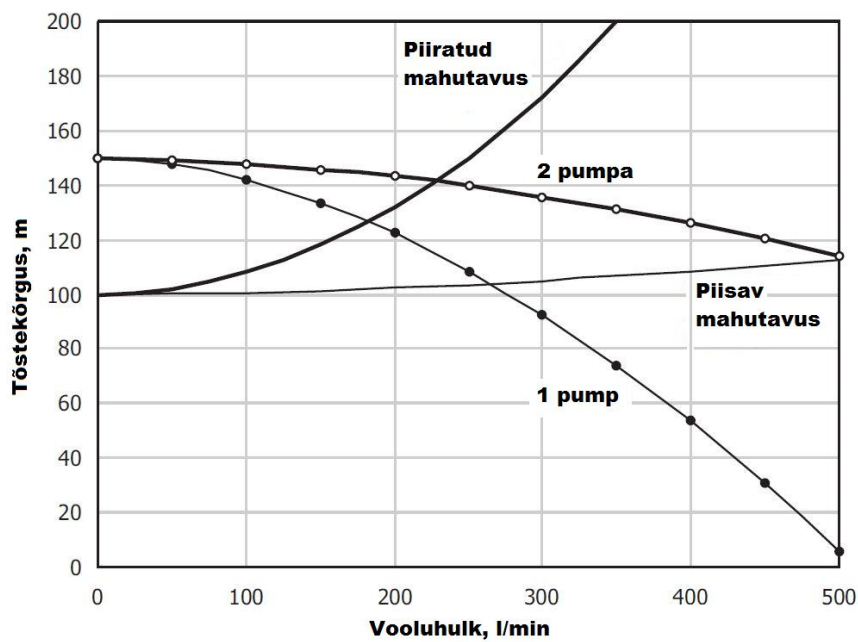
Depressiooni modelleerimiseks (kui veetasapind pumpamise käigus langeb) lahutatakse pumba graafikust vastav kõrgus (m) maha.



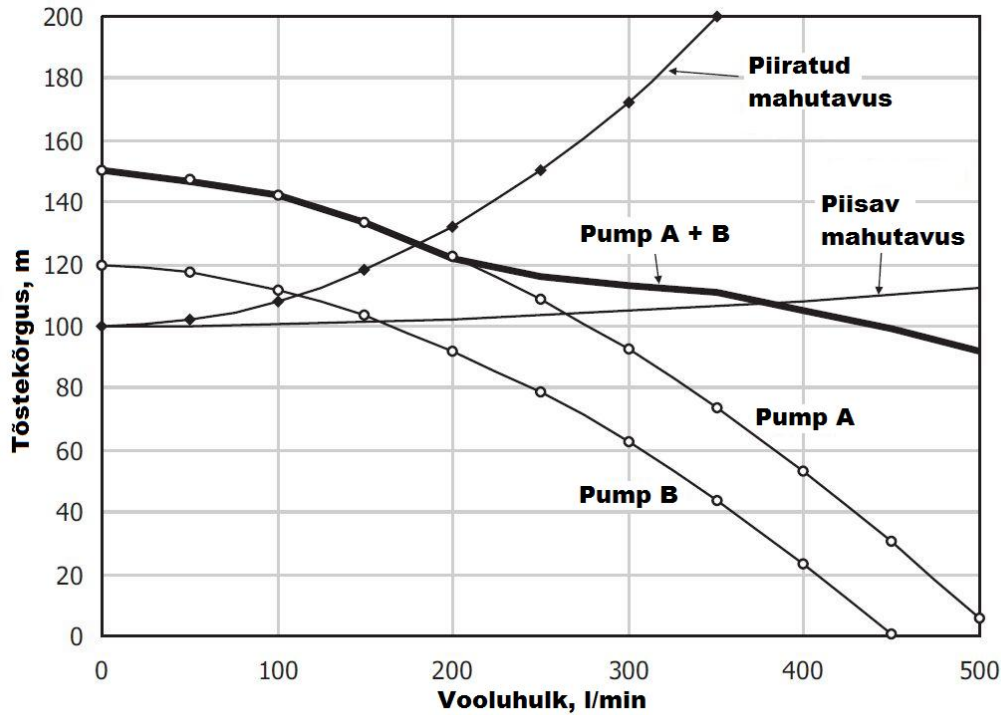
Kaheastmelise pumpamise korral kaasatakse ka mahutid.



Mahutit saab kasutada hädaolukorras (puurkaevu pump ei tööta). Saab kasutada paralleelseid pumpe. Vett saab eelnevalt töödelda (min reageerimisaeg).



Joonis. Identsed pumbad.



Joonis. Erinevad pumbad.

Survekaod pumba imitoru poolses otsas

Tuleb kontrollida, et:

$$NPSH_a > NPSH_r$$

$NPSH$ = net positive suction head (kavitatsioonivaru).

$$NPSH_a = h_{suc} - Z_{pump} + H_{bar} - H_{vap}$$

$$h_{suc} - Z_{pump} = H_s - h_{loss} \text{ (seda saab hinnata mudeliga)}$$

Kui $NPSH_a < NPSH_r$, siis tuleb: (a) pumba kõrgusmärki vähendada; (b) mahuti veetasapinda tõsta; suurendada imitoru läbimõõtu (vähendamaks survekadusid); valida pump madalama $NPSH$ väärtusega. Mida pikem on imitoru süsteem, seda keerulisem on kavitatsioonivaru täitmise nõuet rahuldada. Samas just siin tulebki appi modelleerimine.

Veevarustussüsteemi laiendamine

Laiendatav piirkond sõltub olemasolevast piirkonnast. Tuleks kasutada kalibreeritud mudelit (olemasolev). Seejärel mõõta ühenduspunkti HGL. Veenduda, et uues piirkonnas olevaid tarbijaid saab maapinna erisuse tõttu teenindada (vajadusel näe ette survetõstepumplad - piirkond/hoone).

$$Maapind_{\min} = HGL_{\max} - 10.2 \cdot P_{\max} ,$$

$$Maapind_{\max} = HGL_{\min} - 10.2 \cdot P_{\min} ,$$

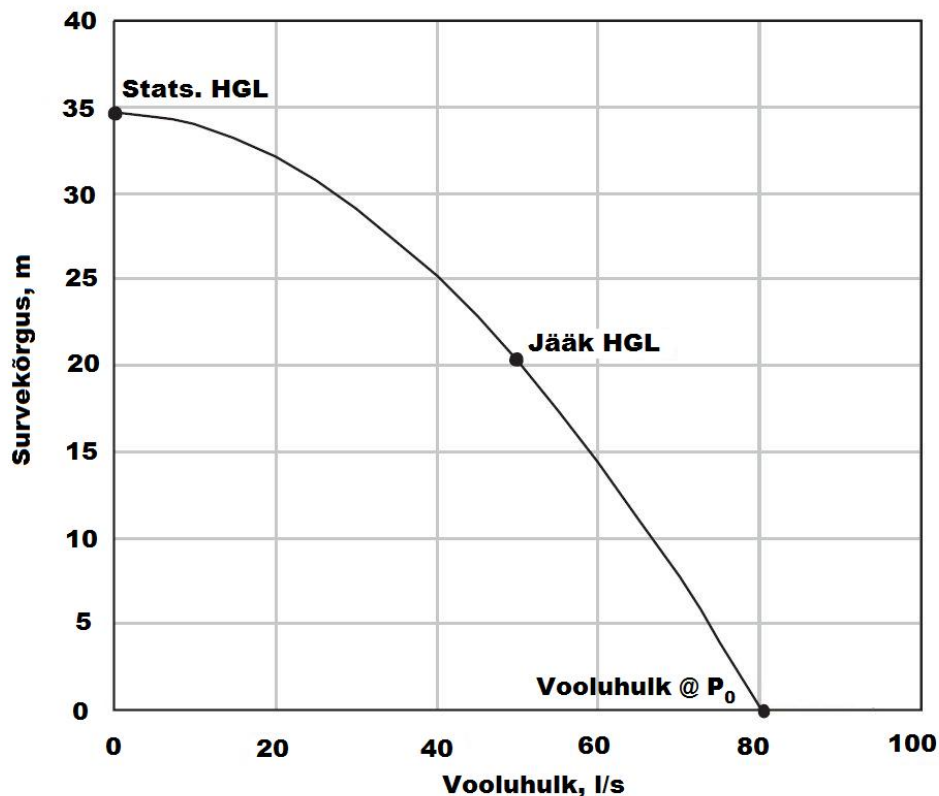
kus: Maapind, HGL – m; P – rõhk (bar).

Eelnevad arvutused aitavad välistada teatud liiki vigasid, nt kasutada liiga suurelõbimõõdulisi torusid, et teenindada tarbijaid. Torud peaks kindlasti dimensioneerima.

Ühenduspunkti läheduses tuleks läbi viia hüdrandikatse (hüdrandi asukoht on vaba).

$$Q_0 = Q_t \left(\frac{P_s - P_0}{P_s - P_t} \right) ,$$

kus: P_s - stats. rõhk; P_0 - rõhk, mille juures Q_0 arvutatakse; P_t - jääkrõhk testi ajal; Q_t - hüdrandi vooluhulk; Q_0 - vooluhulk rõhu P_0 juures.



Ainult ühekordne HGL mõõtmine ei ole õige viis probleemile lähened. Parim on kasutada lähtepunktina olemasolevat ning kalibreeritud mudelit. Kas aga mudel on saadaval, kas seda ollakse nõus jagama? Võib kasutada ka lihtsustatud mudelit (lihtsam koostada), kuid ka see tuleb eelnevalt kalibreerida näiteks hüdrandikatsete baasi. Pumba graafiku koostamine hüdrandikatse põhjal.

Survetsoonide rajamine

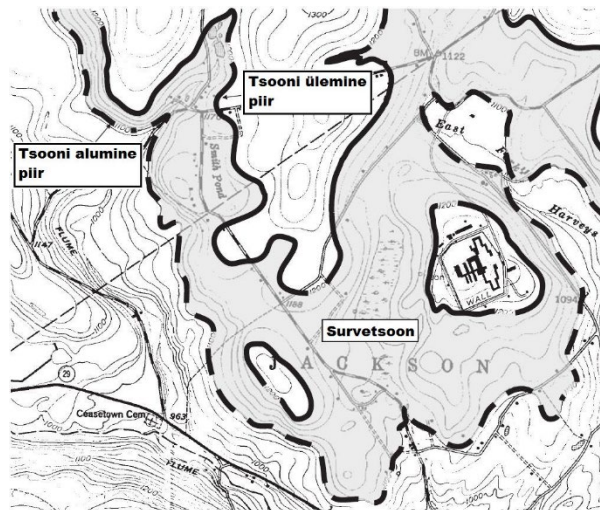
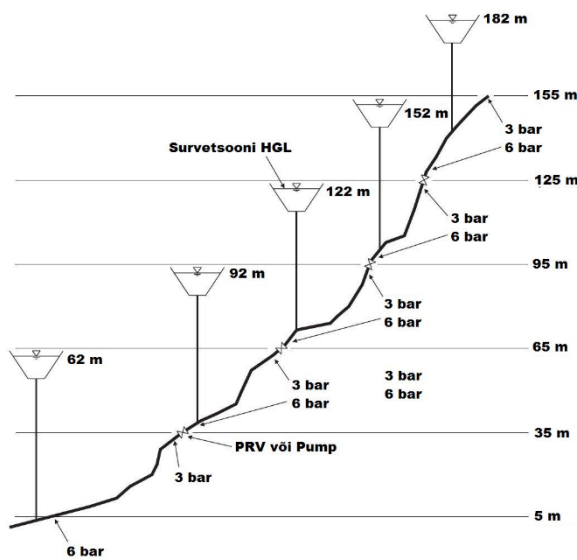
Peale uue survetsooni rajamise otsust tuleb see välja ehitada, mis muuhulgas võib tähendada ka tarbijate kolimist. Üldiselt teostatakse survetsoonideks jagamist parema süsteemi kui terviku huvides. Ühe survetsooni poolt hallatav kõrguste vahe jääb ca 35-40 m kanti.

$$HGL_{\min} > Maapind_{\max} + 10.2 \cdot P_{\min}$$

$$HGL_{\min} < Maapind_{\min} + 10.2 \cdot P_{\max}$$

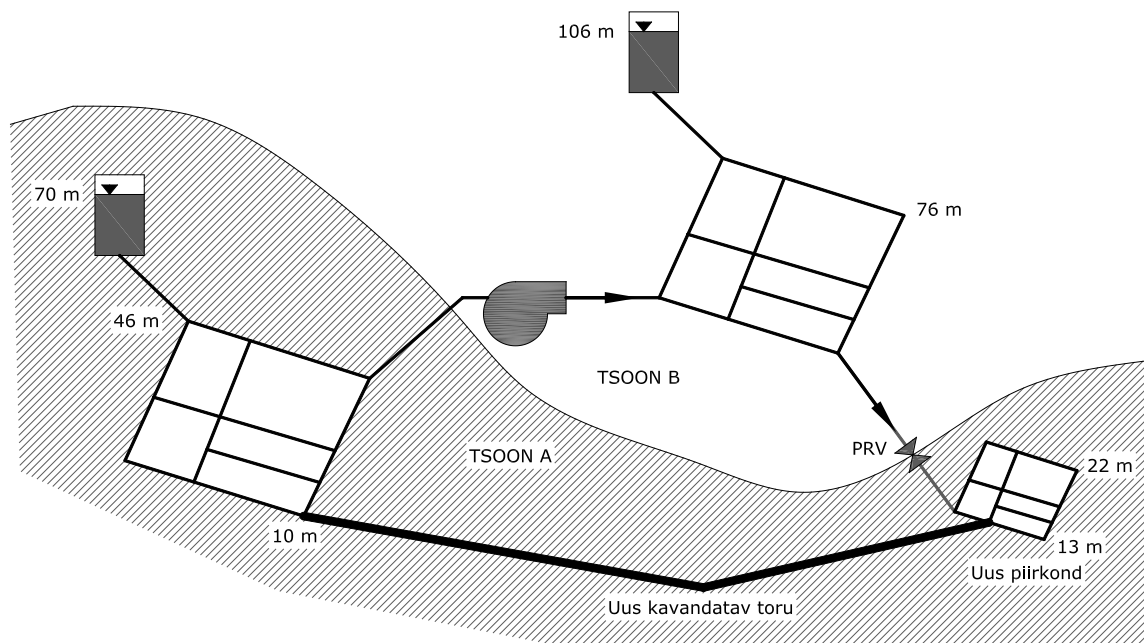
Esitatud seosed kehtivad tavatarbimise režiimidel (mitte tulekahju olukord).

Survetsoonide otsus samakõrgusjoonte alusel

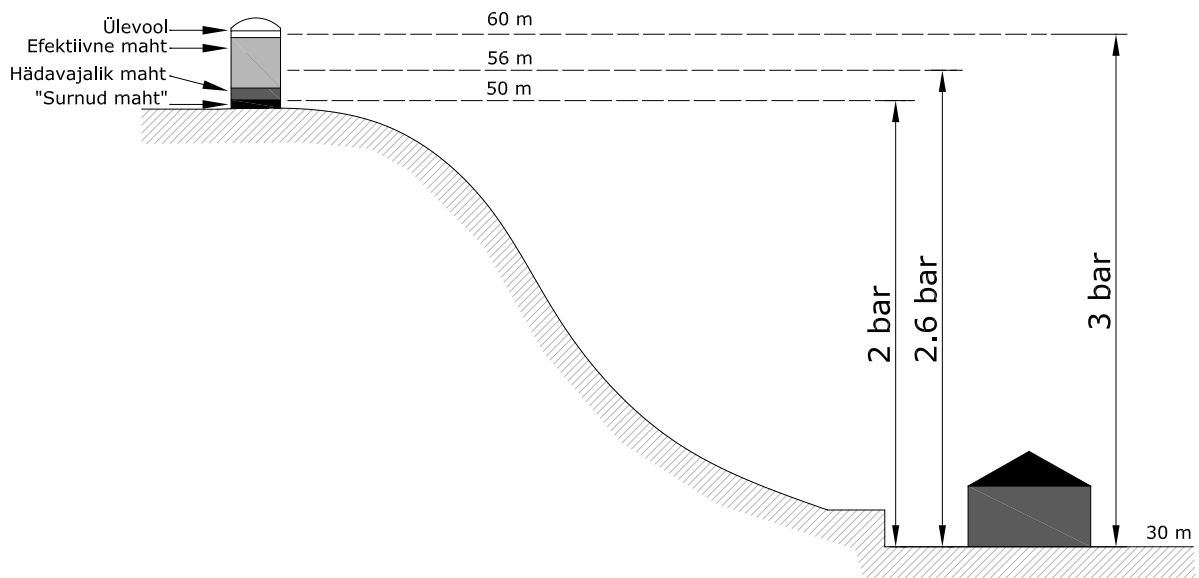


Allikas: Ref #30

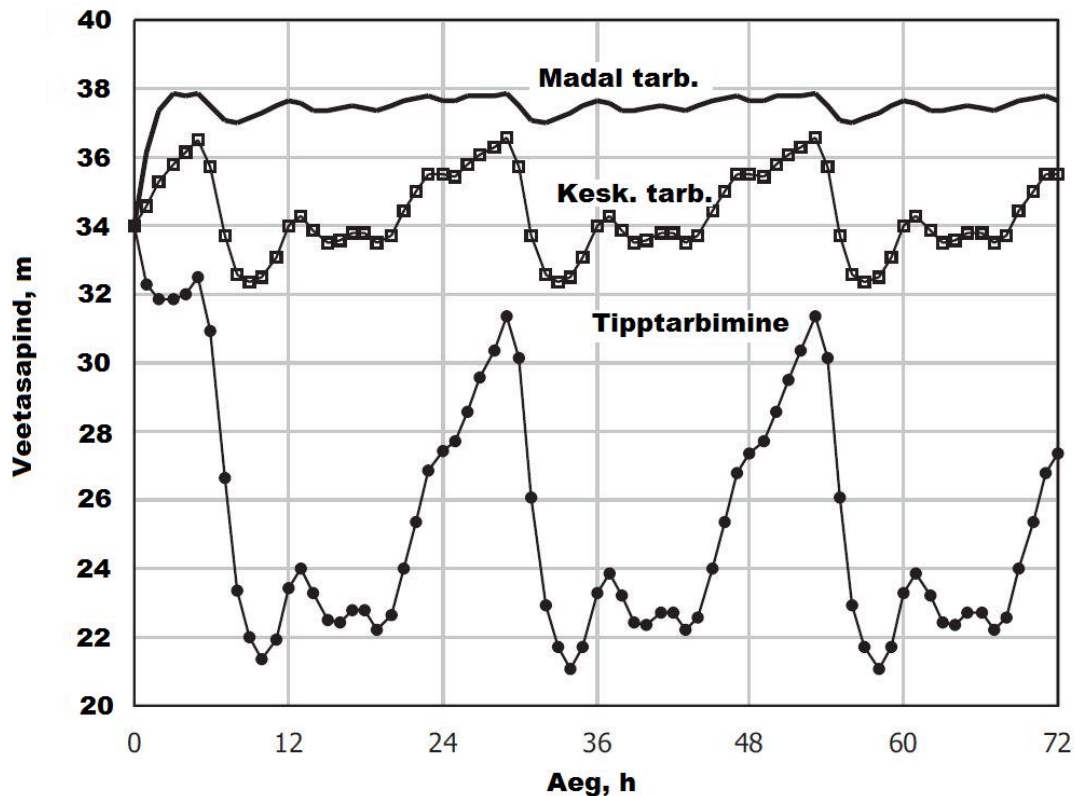
Kas rajada "uus toru" või teenindada kõrgemast survetsoonist (lisada PRV).



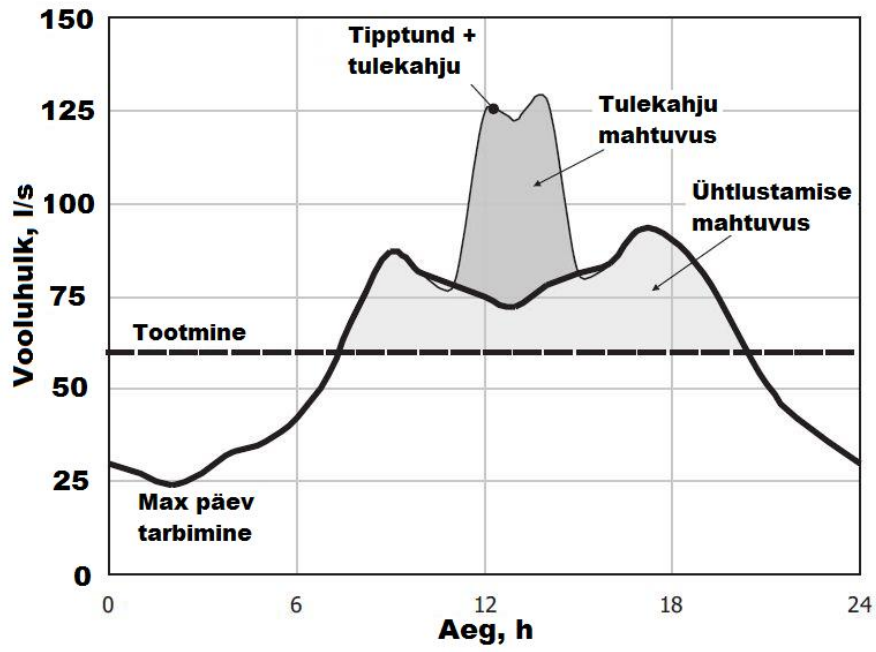
Mahuti disain tuleb vaadata erinevate hooegade lõikes (EPS mudel).



Mida teha aga hooajalisusega? Näiteks pumba kasutamine mahuti juures on kallid. Kõrge mahuti kasutamine võib põhjustada rõhu kõikumist. Torude mahtuvuse suurendamine on samuti kulukas. Soovitav on disainida tippturnile ning kasutada täitumise kontrollimiseks klappi (eeldab SCADA süsteemi olemasolu).

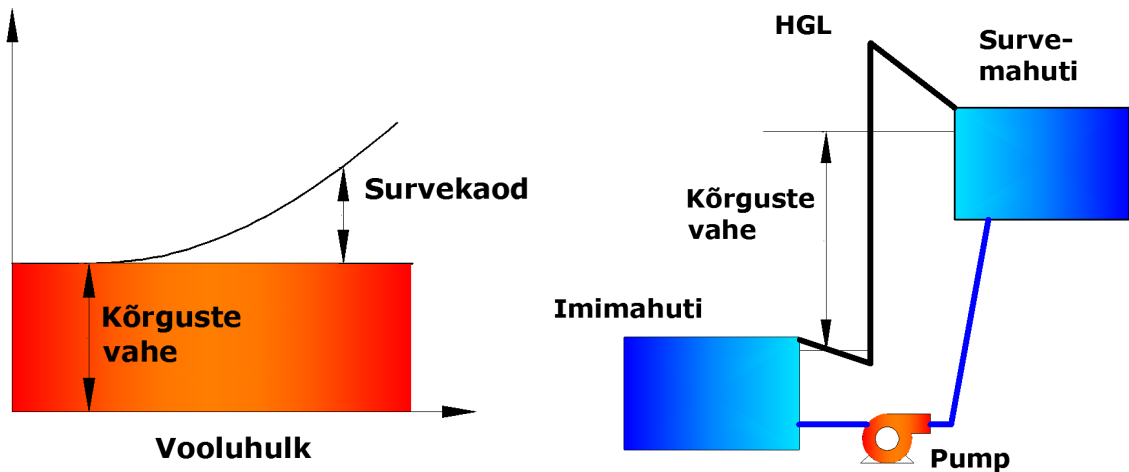


Mahuti mõõtmed valitakse vastavalt soovitavale mahtuvuse tagamisele. Liiga suur mahtuvus võib põhjustada probleeme vee kvaliteediga. Mahuti veetasapinna vähenes viitab liiga suurele mahutile. Mahuti veetasapinna suur langus viitab liiga väiksele mahutile.



Süsteemi karakteristiku koostamine

Süsteemi karakteristik defineeritakse kui pumba vooluhulga ning vastusurve omavahelise seosena. Süsteemi karakteristiku punktid ei sõltu pumbast. Süsteemi karakteristikuid kasutatakse pumba valimiseks (kahe joone omavaheline lõikumine annab tööpunkti). Süsteemi kõverat on suhteliselt lihtne luua süsteemis, kus nii pumba imi- kui survetoru poolses otsas on mahuti, reservuaar, survemahuti. Süsteemi kõver sõltub mahuti veetasapindadest, teiste pumpade töörežiimidest, torude füüsilistest parameetritest ning tarbimistest. Lihtsaim süsteemi karakteristiku saab esitada kahe mahuti vahel.

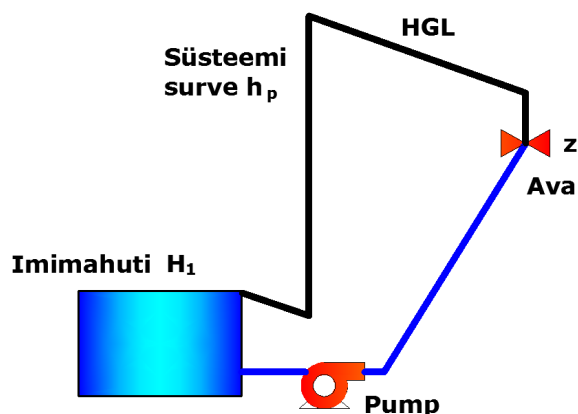


Reaalses veevõrgus on aga süsteemi karakteristikut juba oluliselt keerulisem luua, kuna meil on erinevad toru läbimõõdud, ei eksisteeri lihtsalt ühte konkreetset "k" väärtust ning survekadusid saab arvutada üle mitme tuhande erineva raja. Arvutimudelite abil saab süsteemikõvera leida, kuid enamjaolt seda olukorras, kus süsteemis eksisteerivad mahutid. Mida teha aga suletud süsteemides, kus mahuteid ei eksisteeri?

Suletud süsteemis kogu vooluhulk väljub ühest avast:

$$Q = K\sqrt{h_0} ,$$

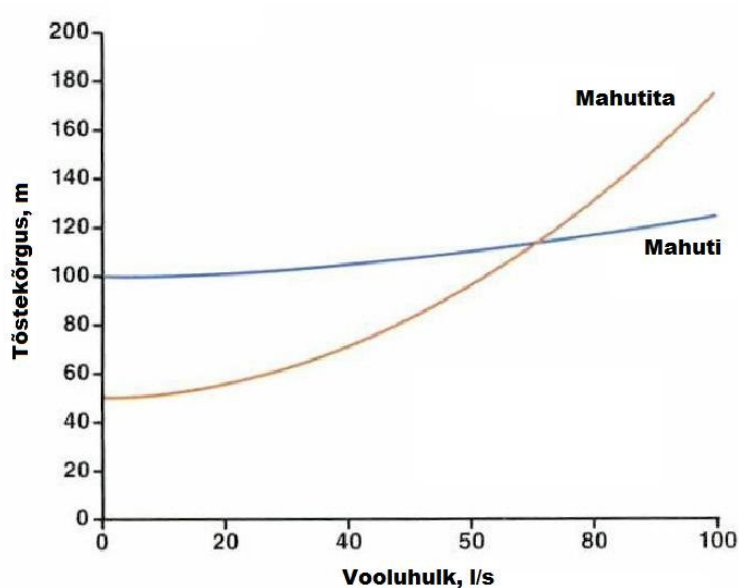
kus: Q – vooluhulk avast/pumbast [l/s]; K – ava takistuskoefitsient; h_0 – survekõrgus ava juures [m].



$$h_p = H_2 - H_1 + kQ^n$$

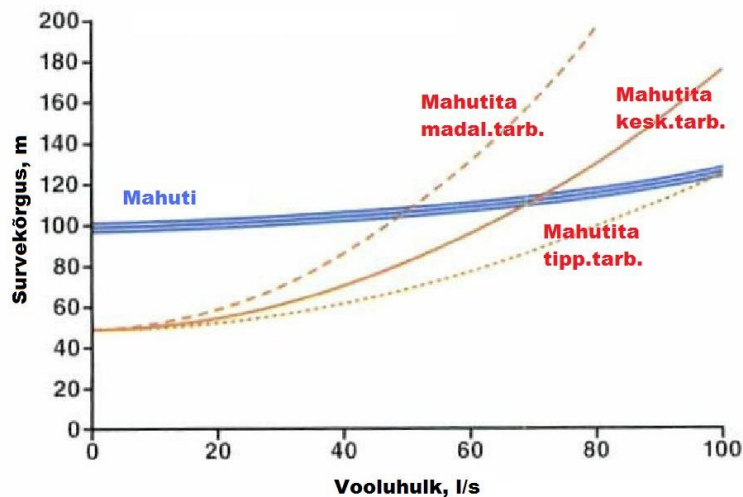
$$h_p = z - H_1 + kQ^n + \left(\frac{Q}{K}\right)^2$$

$$Q = K\sqrt{h_0} \text{ (survekadu avas)}$$

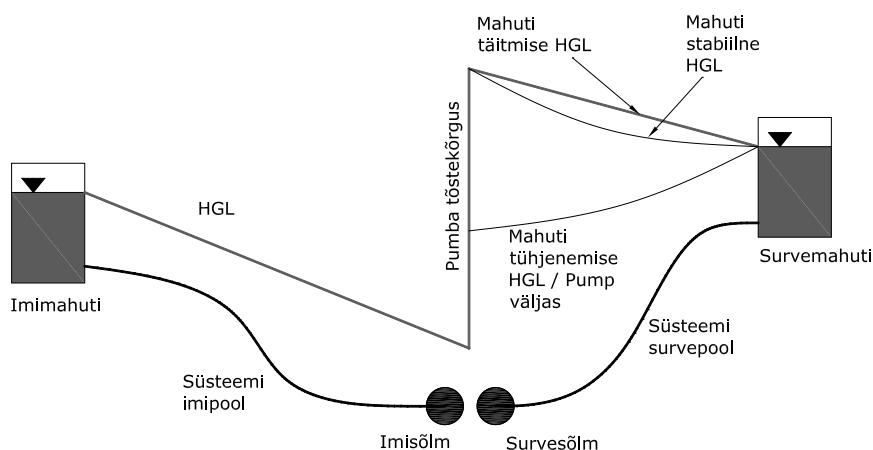


Näiteks: $H_1 = 100 \text{ m}$; $H_2 = 200 \text{ m}$; $z = 150 \text{ m}$; $k = 0.005$; $K = 0.01$; $n = 1.85$.

Mahutiga süsteemis muutuvad süsteemikõverad hooajalisuse tõttu vähe. Mahutita süsteemis muutuvad surved aga laias vahemikes: (a) tarbijad kasutavad rohkem vett – avavad nii-öelda uusi avasid; (b) hoitakse need avatuna pikema aja vältel (tipptund) võrrelduna kesktarbimisega.

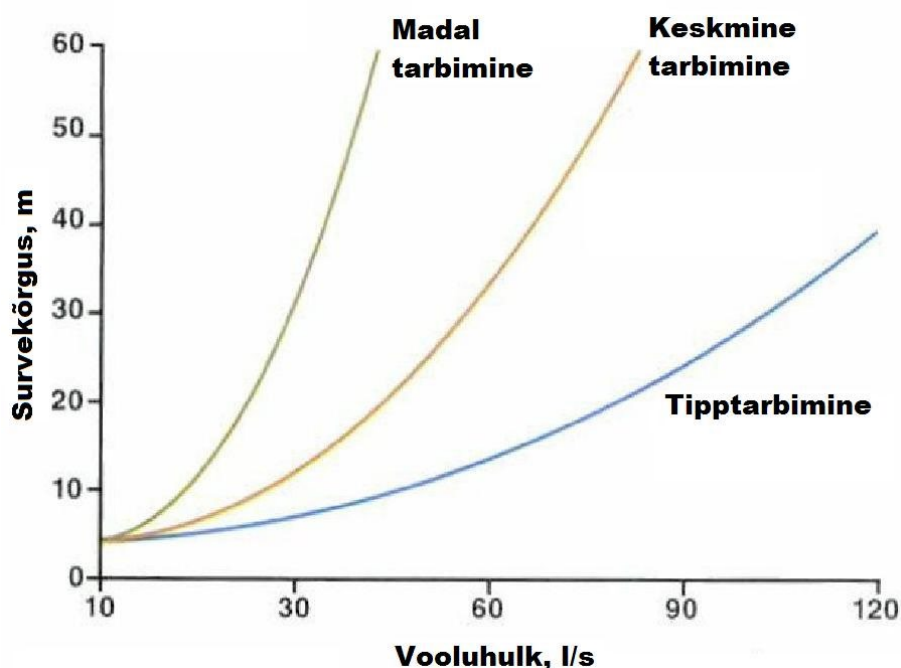


Realse süsteemi süsteemikõvera saab luua hüdraulilise mudeli abil. Mahutite olemasolul tekitatakse nn süsteemi imipool ning survepool. Sisestatakse tarbimised, veetasapinnad. Määratakse vooluhulkade vahemikud. Vali esimene vooluhulk ning sisesta see imisõlme kui tarbimine. Survesõlme see sama vooluhulk kui sissevool süsteemi. Käivita mudel. Leia HGL_{imi} - ning survesõlmes. Arvuta $HGL_{surve} - HGL_{imi}$, sellest tuleb üks punkt süsteemikõverale.



Kui mahuteid süsteemis ei eksisteeri siis on kaks põhilist meetodit:

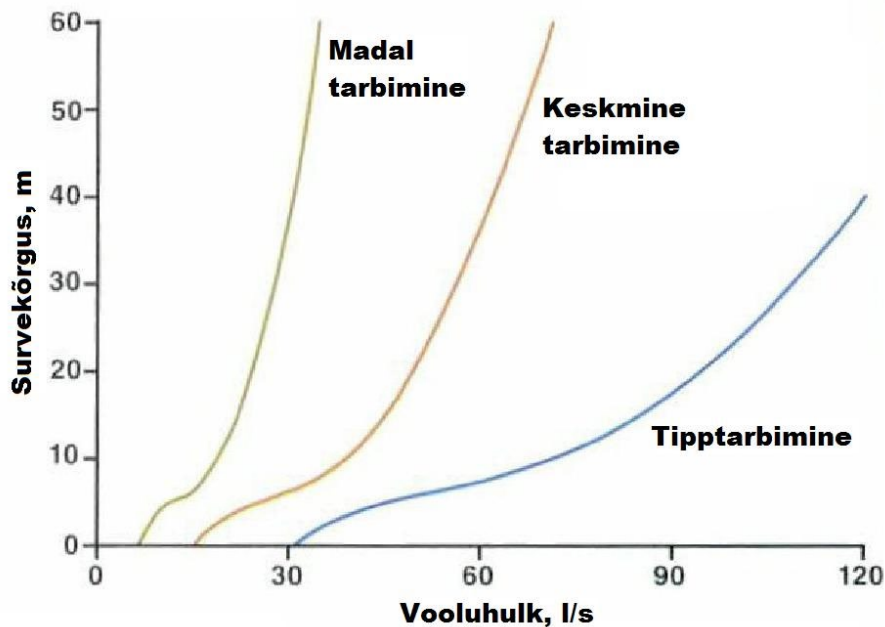
- Vanem meetod - igas sõlmes tuleks tarbimine asendada ava koefitsiendiga (*emitter exponent*). See kehtib aga ühele konkreetsele statsionaarsele olekule. Iga uue vooluhulga korral tuleks need koefitsiendid ümber vaadata / sisestada. Teisisõnu - läbi ava koefitsiendi tuuakse sisse rõhust sõltuv tarbimine.
- Uuem meetod - kasutada rõhust sõltuvat tarbimiskõverat (*pressure dependent demand*). Modelleerijal puudub vajadus süsteemikõvera loomisele vahele segada, see luuakse algusest lõpuni nüüd automaatselt. Rõhust sõltuv tarbimiskõver järgib sisuliselt ava vooluhulga valemit, kuid on üldisem – mistahes monotoonselt kasvav funktsioon survekõrguse ning tarbimise vahel on lubatud.



Näide: torude arv: 105; sõlmed arv: 85; keskmine tarbimine: 60 l/s

Pane tähele, et süsteemikõver võib päeva jooksul muutuda olulisel määral.

Süsteemikõver, kui 50% tarbimisest on fikseeritud ning 50% rõhust sõltuv. Madalatel survetel, fikseeritud vooluhulga-komponent püüab nõ imeda vett läbi pumba. Sellises vahemikus ei tohiks insener süsteemi disainida, teisisõnu fikseeritud tarbimise kasutamine viib eksitavate tulemusteni. Siiski keskmise tarbimise juures järgivad graafikud sama kuju, mis ka eelmises variandis (100% rõhust sõltuvad tarbimised).



Suletud süsteemis on seega pumba töörežiimi hoidmine efektiivses tsoonis üsna keerukas. Mõned võtted, mida kasutada:

- Lihtsaim on installeerida mahuti pumba survepoolele (energia kokkuhoid kui pump ei tööta ning tarbimine on mahutist). Alati pole see aga põhjendatud.
- Sagedusmuunduri (pöörete arvu reguleerimine) lisamine.
- Erinevate pumpade kasutamine pumbajaamas (väiksem – öötundidel, suurem - tipptarbimisel).

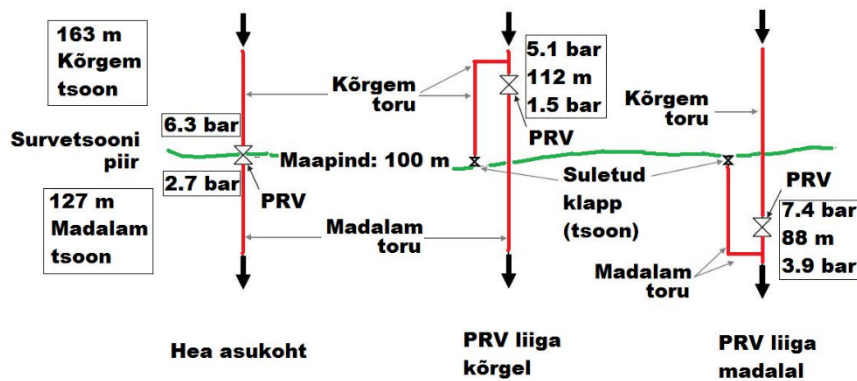
Pane tähele kui pump töötab efektiivselt täispöoretel, siis ei tähenda see automaatselt seda, et sagedusmuunduri abil töötab pump efektiivselt ka teistel pööretel.

Survetsoonide teenindamine madalama rõhuga

Kõrguslikult oluliselt madalamal olevat tarbimispiirkonda ei ole otstarbekas teenindada ülearuse survega. Ülearuse surve mõiste on varieeruv – üldjoontest võib piiriks seada 50 mH₂O. Surve alandamist saab läbi viia järgmiste põhimeetoditega: (a) PRV (*pressure reducing valve*) installeerimine; (b) kontrollklapi installeerimine; (c) PRV + PSV (*pressure sustaining valve*).

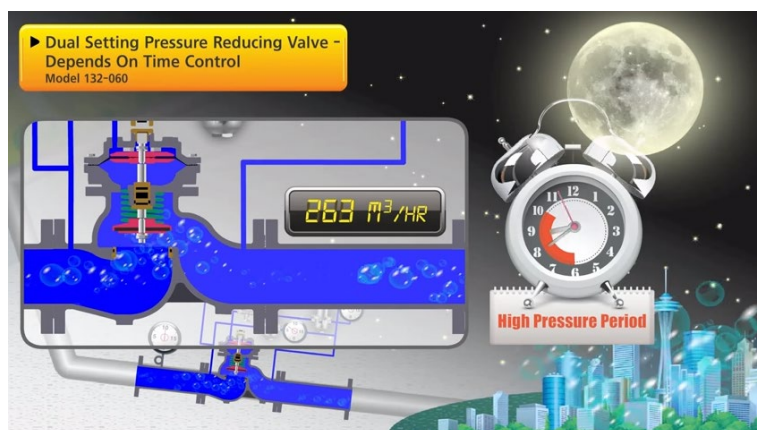
Pressure reducing valve (PRV)

Lihtsaim viis rõhkusid kontrollida. Modelleerimise seisukohast on oluline leida see HGL säte, mis hoiaks piirkonda mõistliku surve all. Survelang PRV klapis peaks olema vahemikus 27 – 34 mH₂O. PRV tuleks paigutada võimalikult lähedale sellele samakõrgusjoonele, mis eraldab survetsoonid.



PRV valikul peab silmas pidama, et väikestel volukiirustel ei pruugi suured PRV klapid piisavalt vooluhulka piirata, mistõttu rõhualandus ei toimi loodetud vahemikes. Sellistel puhkudel tuleks installeerida väiksema läbimõõduga PRV kui toru läbimõõt ise. Näiteks toru läbimõõduga 200 mm aga PRV läbimõõduga 100 mm. Väiksema läbimõõduga PRV kasutamisel tuleb aga kontrollida, et see ei saaks kriitiliseks näiteks eriolukordades (tulekahjuolukord). Kui PRV piirab rõhku olulisel määral, siis tuleb realses võrgus ka kontrollida, kas vajalik vooluhulk suudetakse viia tarbijateni soovitud surve alandusel ning ei teki kaviteerumist.

Kui peale PRV klappi olevas survetsoonis asub mahuti, siis tuleb suure tõenäosusega rakendada PRV klapile erinevaid sätteid (hooajalisus ning mahuti täitmise/tühjenemise režiim). Ühe fikseeritud PRV seadega ei ole võimalik mahutit süsteemi efektiivselt (veetasapinna perioodiline muutumine) kaasata. Seda eriti juhul kui mahuti asub PRV läheduses. Selleks otstarbekas toodetakse näiteks kahe-režiimseid PRV klappe (vaata animatsiooni: <https://www.youtube.com/watch?v=enjHw5qhcQ>).



Allikas: Ref #31

Kontrollklapp

Kontrollklappe kasutatakse selleks, et paremini kontrollida mahuti täitumist madala rõhuga survetsoonis. Selle tööd on võimalik programmeerida (sõltuvalt mahutist saadavatest andmetest). Eeldab kuluka järgimissüsteemi väljaehitamist (omamist) – SCADA. Samuti eeldab kontrolleri lisamist klapile – energiatarbimine (näiteks PRV ei vaja tööks energiat, toimib puhtalt vee-energia, HGL toimel). Kontrollklapi võib seadistada, kas lihtsalt “lahti” või “kinni” või seadistada see dünaamilisemalt nt “pool kinni” jne. Modelleerida saab erinevaid olukordi. Reaalses süsteemis on aga käitumine mõnevõrra erinev. Mudelis seadistame vooluhulka (piirväärtust), samas reaalses võrgus seadistama klapi avanemisprotsenti (nt 35% avatud).

Lihtsaim viis modelleerida on kasutada FCV (*flow control valve*) tüüpi klappi, et teada saada, kas torud ja mahutid on õigesti dimensioneeritud. FCV klapp ei anna meile infot klapi valikuks, kuna tegemist on lihtsalt vooluhulga piirangut esitava klapiga. Kui soovitakse arvutust läbi viia klapi valiku seisukohast, tuleks kasutada TCV (*throttle control valve*) tüüpi klappi. Selle klapi juures on muudetavaks parameetriks kohtsurvekao koefitsient. Kohtsurvekao koefitsiendi ning klapi avamisprotsendi vaheline sõltuvuse analüüs tuleb aga läbi viia mudelist väljapool – klappi tootva firma andmete põhjal. Enamlevinud kasutatavad klapi tüübid on *butterfly valve* ning *ball valve* (kallim aga lihtsamini kontrollitavad).

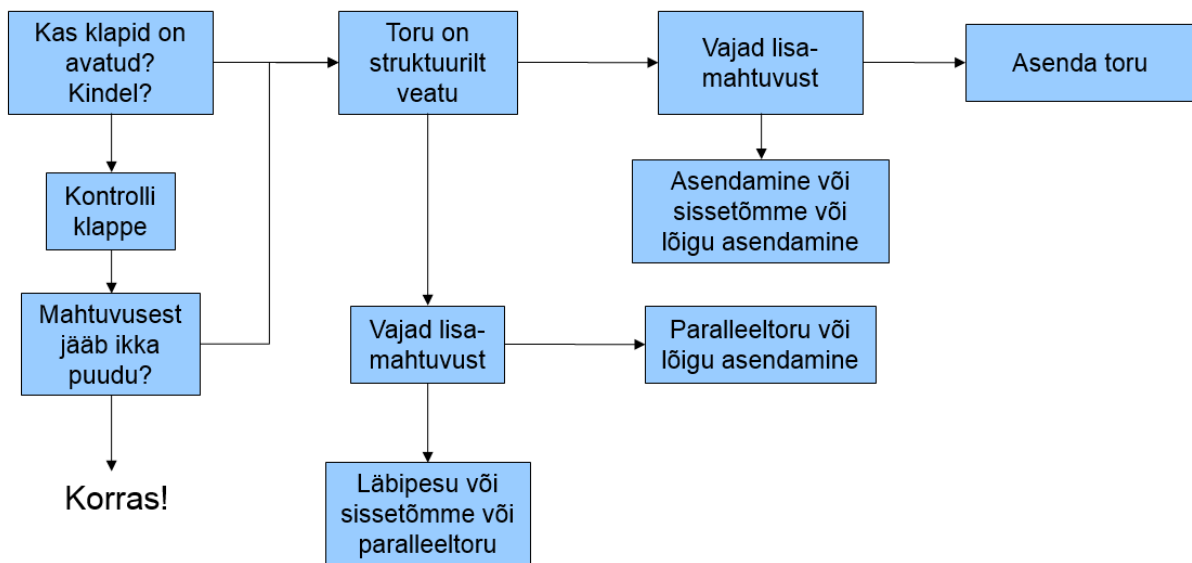
PRV + PSV

Mõnel juhul võib PRV põhjustada olulise survekao kõrgemas survetsoonis. Pikemas perspektiivis oleks parim lahendus suurendada kõrgemas survetsoonis toru läbimõõtu (kallis). Kiirem lahendus on lisada PRV + PSV kombinatsioon, kusjuures PSV peab asuma siis enne PRV klappi. PSV ülesanne on hoida kõrgemas tsoonis rõhku teatud tasemel enne kui vooluhulka kontrollitakse läbi PRV klapi. Samas tuleks modelleerimise käigus uurida veel teisi võimalikke kitsaskohti, mis võivad tekitada olulisi survekadusid kõrgemas tsoonis.

Süsteemide rekonstruktsioon

Rekonstruktsiooni vajadus võib olla tingitud: torude olulisest korrodeerumisest, suurenenud tarbimistest, suurematest kadudest (lekked), infrastruktuuri parendamisest (nt sademeveekanaliseerimise rajamine veetorustike kõrvale) või probleemidest veekvaliteediga.

Rekonstrueeritavates torustikes on probleemid keerukamad kui värskest disainitavates torustikes, kuna töötame olemasolevate torustikega. Võivad tekkida konfliktid teiste süsteemidega (gaas, sademevesi, kanal jt). Meil on terve rida alternatiivseid lahendusi, mida kaaluda: (a) olemasoleva toru asendamine; (b) paralleeltoru; (c) uue toru sissetõmme (läbimõõdu vähenemine). Rekonstrueeritavates torustikes on probleemid nõrgemad kui värskest disainitavates torustikes, sest rajatingimused on paigas (mahutid, pumplad) ning survetsoonid on juba rajatud ja neid üldjuhul ei muudeta.



Joonis. Rekonstrueerimise protsessi ülevaade.

Toru asendamine

Vee-ettevõttele äärmiselt kulukas. Projekteerija / modelleerija peab leidma just need torud, mis on mahutavuse seisukohast oluline välja vahetada. Vaheta esmalt välja läbimõõdud 100 – 150 mm, kui tegemist on vanade torudega, sest neil on üldjuhul ka väiksem seinapaksus, kui suurema läbimõõduga torudel.

Paralleeltoru lisamine

Alati pole otstarbekas lisada paralleeltoru, vaid hoopis lisatoru vaadeldavasse, kriitilisse piirkonda, mis lühendaks nn teepikkust voolu lõikes (nn uus selgroog). Kontrollida toru asukohta tulekahju olukorras, vajadusel nihutada hüdrandid suurema läbimõõduga torule (reaalses võrgus).

Toru läbipesu ning sisepinna katmine

Kasutatakse juhtudel, kui olemasolev toru on struktuurilt terve. Mahutavus oluliselt ei muutu, kui toru pole olulisel määral korrodeerunud (seega ei ole ette näha tarbimise kasvu tulevikus). Väiksema läbimõõtude torude asendamine on samas hinnaskaalas kui nende puhastamine (läbimõõdud 100 - 200 mm). Toru puhastamine on kõige ökonoomse siis, kui uue installeerimine pole võimalik või on väga

kulukas (ristumine erinevate teiste torudega, maapinna taastamistööd). Juhul kui on ette näha, et puhastatud toru võib ajapikku taas olulisel määral korrodeeruda, on soovitatav kaaluda selle sisepinna katmist (tsement, epoksüliim). Mistahes puhastamise või sisepinna katmise järel on oluline kasutada modelleerimise toru tegelikku sisemist läbimõõtu. Puhastamine üldjuhul suurendab läbimõõtu, sisepinna katmine aga vähendab seda teatud määral.

Toru sissetõmme

Olemasolev toru läbimõõtt võib vähendada olulisel määral. Otstarbekas juhul kui pole vaja teostada arvukaid ühendusi sissetõmmatud toruga. Uut, sissetõmmatud toru saab modelleerida uue siseläbimõõdu ning kareduse väärtuse sisestamisega.

Toru paisutamine

Olemasolev nn paisutatakse lõhki, purunenud toru osad lükatakse ümbritsevasse maapinda ning selle asemele lisatakse uus toru lõik. Selle meetodi abil on põhimõtteliselt võimalik olemasolev läbimõõtt asendada ka suurema läbimõõduga, et mahutavust teatud lõigus suurendada. Kaevandustööd vajalikud tarbijate ühendustorude kohtades.

Jooksev kulu ning kapitali maksumus

Pumbajaama vahetus lähetuse on otstarbekas kasutada suurema läbimõõduga torusid, et (a) vähendada survekadusid ning sellest lähtuvalt ka kulutusi energiale; (b) toru läbimõõdu vahetamine tähendab nii kapitali maksumust (toru vahetus) kui ka jooksvat kulu (energiatarbimine lähtuval uuest survekaost).

$$TC = \sum_{\text{torud}} f(D, x) + PW \cdot \int \frac{k_1 \cdot Q \cdot p \cdot (h_1 + k_2 \cdot D^{-4.87})}{e},$$

kus: TC – kogukulud eluea vältel; $f(D, X)$ – kapitali kulud; D – läbimõõt (m); x – torude seisukord; PW – hetke tasuvus-väärtus; k_1 – energia ühikteisendus faktor; Q – tegelik vooluhulk ajas; P – energia hind (€/kWh); h_1 – tõstekõrguse hind; k_2 – süsteemi karakteristikuid kirjeldav koefitsient; e – kaablilt-veele energia efektiivsus.

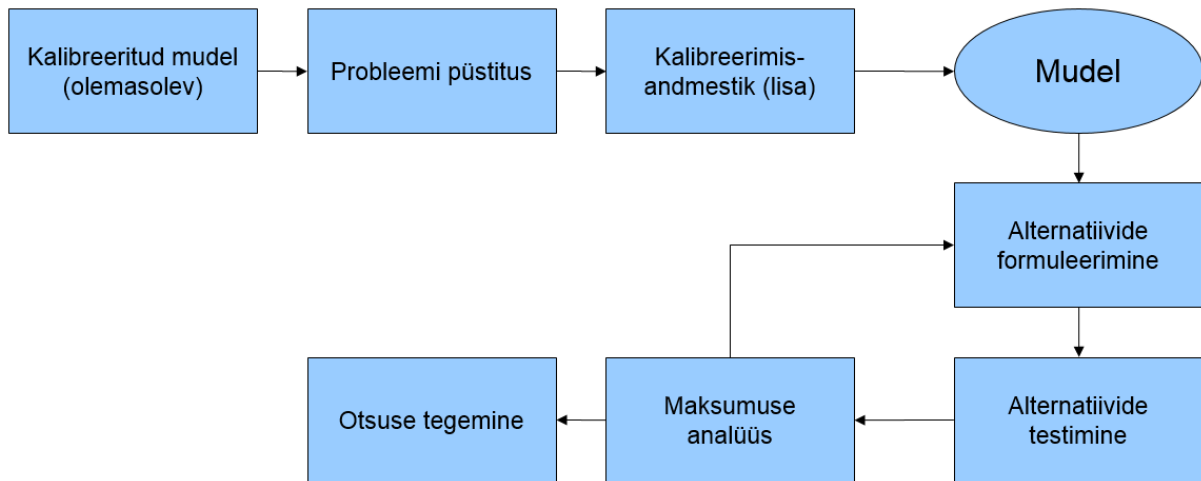
Suurem osa koguenergiast kulub rõhu tõstmiseks süsteemis. Kapitali maksumuses osaleb vaid survekaost sõltuv energiakulu, mis omakorda sõltub toru läbimõõdust. Pumbajaamale tehtavad kulutused ei sõltu survekaost ning selle esialgset ehitusmaksumust ei tuleks seetõttu arvestada ka maksumusanalüüsi.

Mahutite disain ja opereerimine

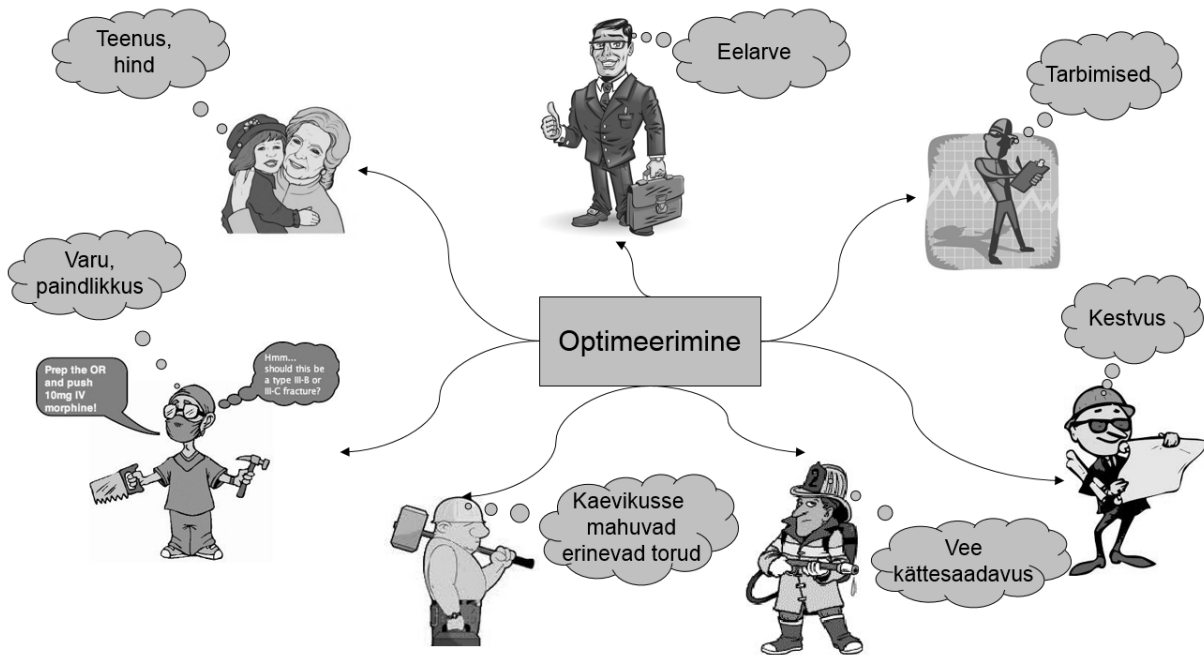
Matemaatilised mudelid aitavad mõista, mismoodi toimub vee segunemine mahutis. Niinimetatud musta kasti mudelites (sisse-väljavool) hinnatakse väljuva vee kvaliteedi siseneva vee kvaliteedi põhjal. Eeldatakse ideaalset segunemisprotsessi ning pikkasid ajaperioode keeruline vaadelda tervikus hüdraulilises mudelis, selleks võib kasutada vaid mahutites toimuva protsessi analüüsi (SCADA andmete põhjal) – *AWWA CompTank*. Teiselt poolt saab kasutada arvutuslikku vedelike dünaamikat, mis põhineb vedeliku füüsikalisel liikumisel, kaasaates massi jäävust, inertsit ning liikumisenergia jäävust. Eeldab numbrilist lahendamist, kus saab arvestada – temperatuuri kõikumisi, mittetatsionaarset voolamist, veekvaliteedi tingimusi ning ainete hajumisi mahutites. Sedalaadi tarkvara on spetsiifiline ning seetõttu ka kallis (*ANSYS FLUENT, Flow-3D*).

Optimeeritud disain / rekonstruktsioon

Optimeerimine veevõrgusüsteemis on prima (optimaalseima) lahendi leidmine veevõrgusüsteemi probleemile.



Optimeerimise juures on vaja tegeleda väga erinevate üksikute ülesannetega.



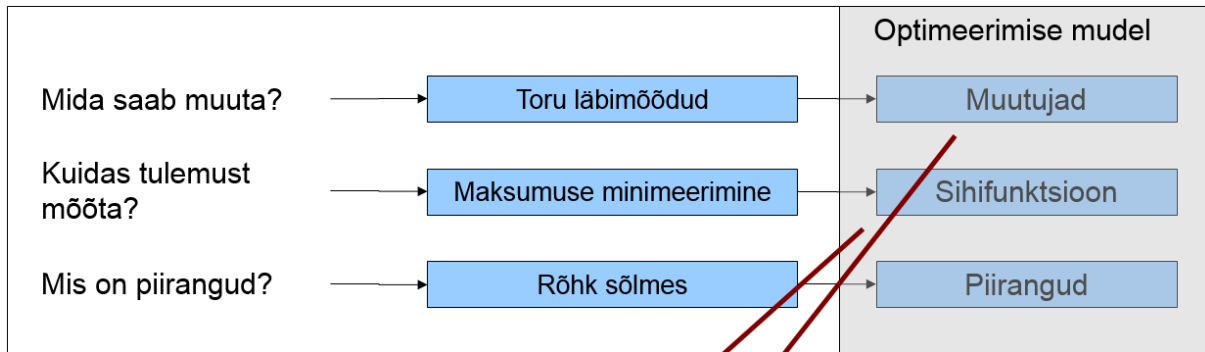
Allikas: Ref #32

Optimeerimise tehnikad võimaldavad läbi mängida mitmeid erinevaid alternatiive. Esmased optimeerimise võtted (rakendatuna veevõrgu-süsteemile) pärinevad 1971.

Terminoloogia

- Sihifunktsioon – mõõdik, mis näitab, kui hea üks või teine lahend on.
- Muutujad (*decision variables*) – parameetrid, mida optimeeritakse.

- Piirangud (*constraints*) – defineerivad muutujate ning lahendite ruumi (ruum kui kõikide võimalike lahendite kogum). Erinevad piirangud võivad üksteist mõjutada (toru suurem läbimõõt vs vajalik tulekahju vooluhulk vs veekvaliteet).

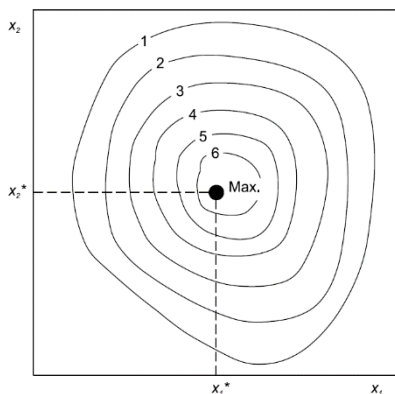


Matemaatiliselt kirja panduna:

Sihifunktsioon: $Maxf(x)$

Mis lähtub piirangutest: $g(x) \leq 0 \quad h(x) = 0 \quad x \in X$

Miinumum/maksimumülesande lahendamist saab visualiseerida mäe tipu üles leidmisega.



Optimeerimine on protsess, mille käigus leitakse parim (või optimaalseim) lahend käsitletavale probleemile. Lahendamiseks saab kasutada väga laia algoritmide valikut, kuid vähesed on tavakasutajale kättesaadavad (kasutajaliides). Optimeeritakse üldjuhul maksumust lähtuvalt: (a) hüdrauliline otstarbekus; (b) tarbimiste tagamine; (c) rõhu tagamine. Optimeerida saab ka toru läbimõõtu ja seda lähtuvalt maksumusest (üks sihifunktsioon).

$$\min_x f(x) = \sum_{i=1}^N c_i(x_i, l_i),$$

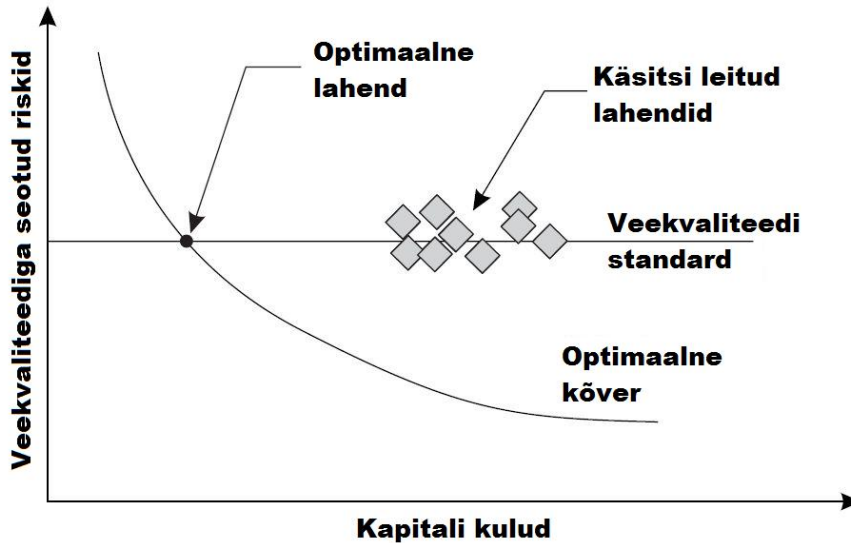
kus: f – minimeeritav sihifunktsioon; x – teadmata torude läbimõõdud vektorkujul; N – torude arv; c_i – maksumuse funktsioon torule i ; l_i – toru i pikkus.

Optimeerimise piirangud võivad olla: minimaalne/maksimaalne surve sõlmes, minimaalne/maksimaalne kiirus torus, minimaalne usaldatavuse vajadus ning mahuti veetasapinna periood (nt 24h). Rekonstruktsiooni juures saab samuti kasutada optimeerimist ühes ajalise planeerimisega, kus

minimeeritakse maksumust tööde teostamise hetkel (eelarve), kuid maksimeeritakse kogutulu, mida saadakse projekti lõppedes (nt kaevandustööd külmunud pinnases).

Optimeerimist kasutatakse selleks, et leida hea, odav lahend kõikvõimalikest variantidest. Samas, kuidas saab defineerida kõikvõimalikud? Ükski modelleerija ei suuda aimata õiget lahendit ja kas see on ikka kõige parem. Olgu näiteks 10 toru ja 10 võimalikku läbimõõtu – teoreetiliselt on võimalike lahendite hulk $10^{10} = 10'000'000'000$ alternatiivi.

Käsitsi (või kogemusel arvamine) lahendi leidmine üldjuhul ei taga mitme erineva kriteeriumi korraga täitmist. Meenusena, veevõrgumudel on mittelineaarne. Seega ühe parameetri muutmine võib oluliselt mõjutada kõiki teisi. Kriteeriumile vastamine on küll lihtne aga keerukust lisab selle maksumus.



Optimeerimine on modelleerimise viis nagu ka iga teinegi mudeli rakendus. Oluline on rõhutada, et modelleerimine ei asenda otsustamist, vaid see lihtsustab otsust vastu võtta. Optimeerimist saab vaadata ühesihilisena ning mitmesihilisena.

Ühesihilise juures on üks eesmärk (minimeerida riski, maksimeerida usaldatavust, minimeerida maksumust jne). Ühesihilist optimeerimist saab vaadata mitmesihilisena, kui kõik üksikud soovitud eesmärgid saab taandada ühele kindlale mõõtmele (nt maksumusele). Samas ühesihilise optimeerimise probleem ei suuda omavahel võrrelda erinevaid eesmäärke.

Näiteks on meil vaja minimeerida maksumust ($\min f_1$). Samas on vaja ka maksimeerida kasu ($\max f_2$). Seega saame, kas mõlemat minimeerida või maksimeerida.

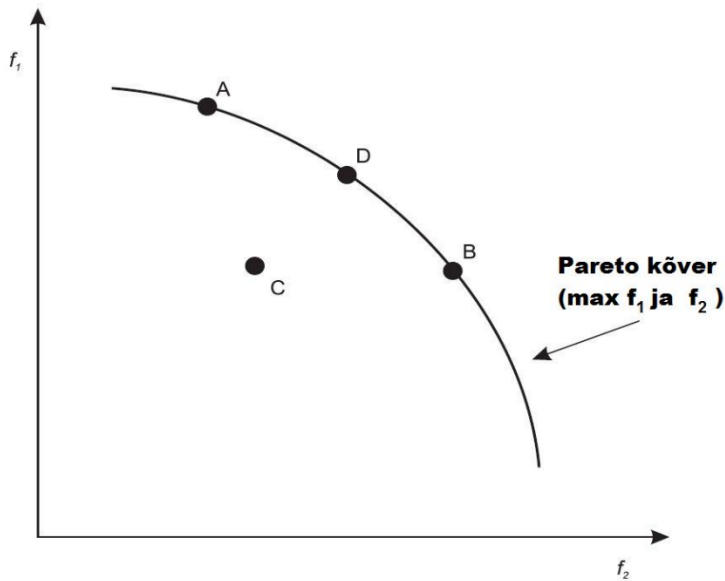
$$\max f_2 = \min (-f_2) = \min f_2'$$

Sellisel juhul saab sihifunktsiooni üles kirjutada (võrreldes $\max f\{x\}$):

$$\max f = \max (w_1 f_1 + w_2 f_2'),$$

kus: w – ühe parameetri kaal võrreldes teisega.

Mitmesihiline optimeerimine tähendab erinevate eesmärkide omavahelist põimumist, kus tõuseb teatud ühislahendite hulk (*tradeoff*, Pareto kõver).

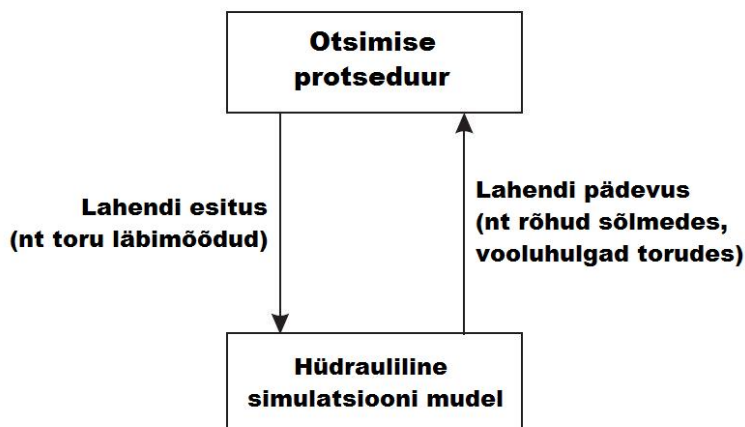


Jooniselt: D on parem kui C, sest D maksimeerib nii f_1 kui f_2 . A ja B kuuluvad samasse ühislahendite hulka, kuna domineerimine siin puudub. Minnes ühelt lahendilt teisele, pole võimalik tõsta mõlemat eesmärki (paremuse poole).

Optimeerimisel on erinevaid rakendusi. Näiteks: (a) automaatne kalibreerimine (eesmärk sobitada mõõdetud vs modelleeritud andmeid); (b) mõõtmispunktide valiku analüüs (tundlikkuse analüüs), asukohtade valik (maksimeerida täpsust, minimeerida andmete kogumist); (c) opereerimise optimeerimine (pumpade jooksvad kulud); (d) disain/laiendamine (enamjaolt ühesihiline – torude maksumus, kuid tegelikkuses on palju teisi faktoreid – nt pump, mahuti jne); ning (e) rekonstrueerimine (milliseid komponente vahetada/lisada).

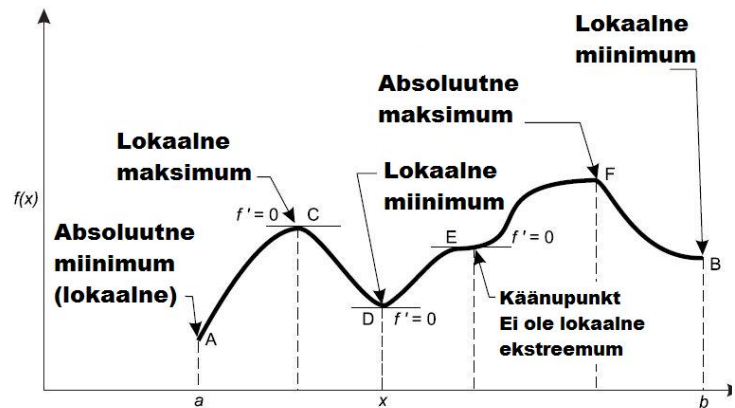
Optimeerimise meetodid

Ühed keerukamad meetodid oma olemuselt on otsimisel põhinevad meetodid, mis matkivad erinevaid looduslikke protsesse, teisisõnu niinimetatud kohanemisvõimelised otsimise meetodid. Üheks selliseks näiteks on geneetiline algoritm (*genetic algorithm, GA*).

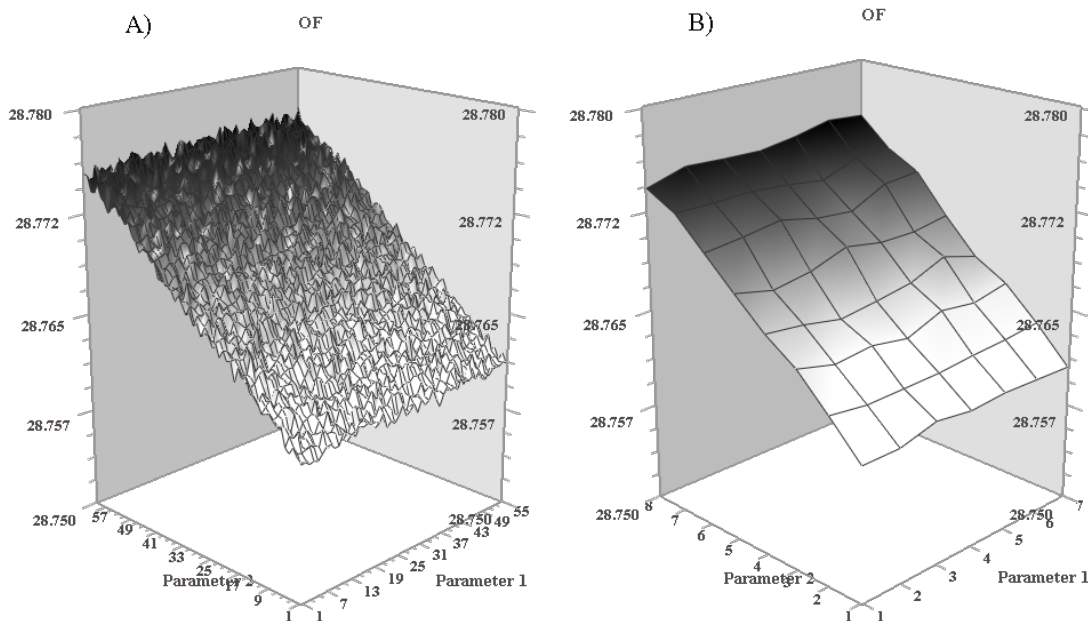


Analüütiline optimeerimine

Analüütilise optimeerimise juures piiranguid kui selliseid ei eksisteeri. Üks sihifunktsioon ja seega ka üks optimaalne lahend. Analüütiline optimeerimine annab võimaluse defineerida keerukamaid algoritme.



Problemaatiline keerukate probleemide lahendamisel, kui me ei luba sammu pikkusel muutuda (valida optimaalne samm).



Allikas: Vassiljev, 2005

Lineaarne programmeerimine

Lineaarne programmeerimise (LP) juures on sihifunktsioon ning piirangud ise on lineaarsed funktsioonid. Lineaarse programmeerimise meetodit võib visualiseerida mäena, millel on sirged servad (leitakse kõige kõrgem tipp). Eeliseks on, et kui optimum eksisteerib, siis LP selle ka leiab. Saadaval palju erinevaid tarkvarasid. Peamiseks puuduseks on see pole eraldiseisvalt rakendatav veevõrgusüsteemi probleemidele (va hargvõrgud).

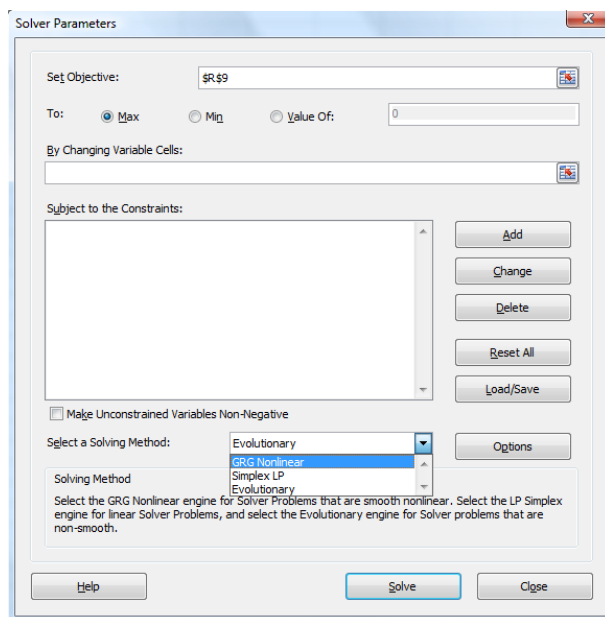


Vaata näiteks *Simplex meetodit*: https://en.wikipedia.org/wiki/Simplex_algorithm

Mittelineaarne programmeerimine

Mittelineaarne programmeerimise juures on mõned funktsioonid (optimeerimise probleemis) mittelineaarsed muutujate suhtes. Seeläbi saame süsteemi ka realistlikumalt esitada, kuid sellega kaasneb arvutuslik keerukus, sest optimaalne lahend ei pruugi asuda ekstreemumis ning mitmest lokaalsest optimumist on keerukas valida globaalset optimumi. Erinevad meetodid otsivad optimumi sihifunktsiooni järsuma tõusu järgi. Mida lamedam on tõusu jätkumine, seda aeglasemaks muutub arvutusprotsess. Mõned meetodite näited on:

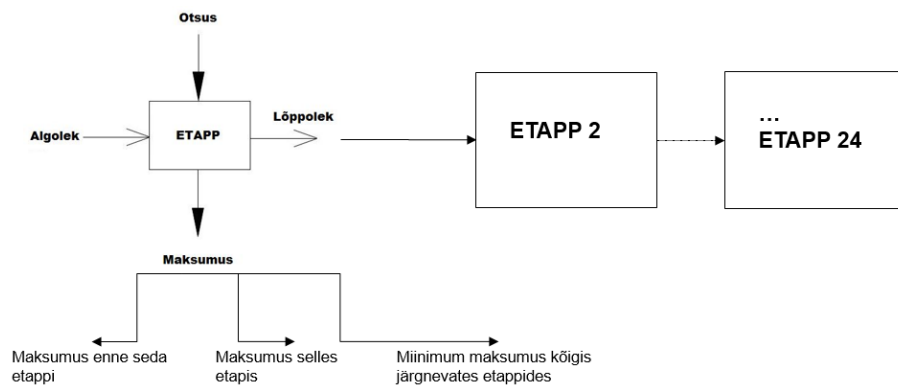
- *Newton-Raphson* – hea meetod, kui lähtevalik optimumi lähedal
- *Levenberg-Marquardt* – kombineeritud meetod (tuletisel põhinev + *Newton-Raphson*). Probleemiks, et globaalse optimumi asemel esitab lokaalse optimumi (kõik nn *hill-climbing* meetodid). Juhul kui otsingusammu pikkust muuta, on võimalik sellest probleemist üle olla.
- *MS Excel Solver* – kasutab mittelineaarse probleemi lahendamisel *generalized reduced gradients* meetodit.



www.solver.com

Dünaamiline programmeerimine

Dünaamilise programmeerimise (*DP*) juures jagatakse probleem üksikuteks alametappideks (*stage*). Näiteks 24h pumpamine tähendab 24 alametappi (iga tund). Pumpamise tagajärjel mingi element saavutab uue oleku/seisundi (*state*). Seda seisundit tuleb kirjeldada (*DP* üks keerukamaid osasid).



Seisund (olek) tuleb diskretiseerida. Näiteks kui reservuaar saab omada 10 erinevat veetasapinda, siis järgmises etapis saab olla ka 10 erinevat veetasapinda – seega kokku tuleb läbi arvutada 10×10 erinevat juhtumit. Kui aga süsteemis on nt 3 reservuaari – seisundeid kokku on 1000, arvutusi 1000^3 . DP on kasutatav lihtsamate (hargvõrk, magistraalitoru) veevõrgu probleemide juures, kuna muutujate arvu kasvades, kasvab erinevate olekute arv kolossaalselt. DP on siiski laialt kasutatav hüdrooloogiliste protsesside optimeerimises.

Mittekohanduvad otsimismeetodid

Mittekohanduva otsimismeetodi (*non adaptive search methods*) juures on mäe tipu ülesleidmiseks vaja parandada algselt valitud (suvalise) punkti funktsiooni väärtust (max kõrgus) mingi test-strateegia põhjal. Eesmärk on leida hea sihifunktsiooni väärtus ning leida võimalus, kuidas seda saaks parandada (kust edasi otsida). Näiteks juhuslik otsimine (*random search*):

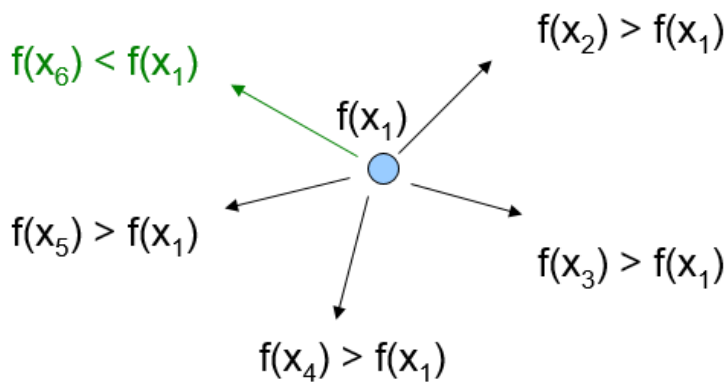
- Joodik metsas (kõik liikumissuunad on võrdse tõenäosusega – tippu on keeruline leida);
- Joodikud metsas (langevarjuga maandusid suvalistesse kohtadesse), eeldatakse, et üks neist leiab kõrgeima tipu.



Allikas: Ref #33

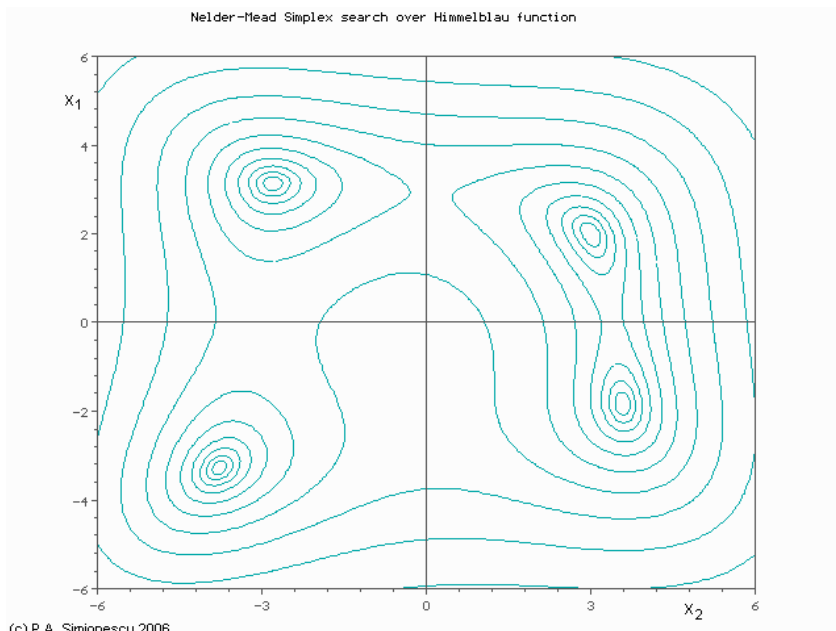
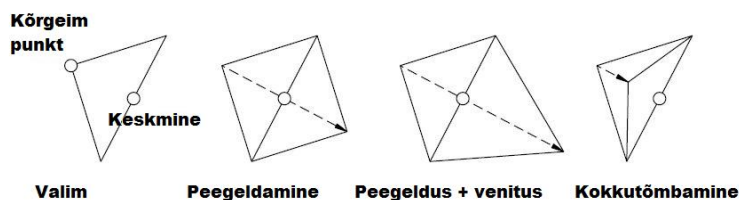
Oluline osa on siin õnnel. Mida keerulisemad probleemid, seda väiksem on võimalus, et optimum leitakse.

Siia alla kuuluvad ka mäeronimisstrateegiad (*hill-climbing strategies*). Näiteks, matkaja proovib leida mäetippu võimalikult väheste sammude jooksul. Iga uus lahend annab informatsiooni, kuidas edasi liikuda. Praktikas on sedalaadi meetodid laialt kasutust leidnud (*direct search method*).



Samasse gruppi kuuluvad veel:

- *Fibonacci Coordinate Search* – otsimisintervalli jagamisel põhinev;
- *Hooke and Jeeves Pattern Search* – otsimine jagatud kaheks: ümbrusse otsimine (*exploratory*) ning asukoha muutmine (*pattern move*);
- *Downhill Simplex Search* – otsimisintervalli jagamisel põhinev, kus otsitakse paremat punkti (miinimumi) algset punktivalimist väljapoolt (peegeldus/venitus vs kokkutõmbumine).



(c) P.A. Simionescu 2006

Allikas: Ref #34

Vaata animeeritult: Simiprof, Nelder Mead, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Nelder_Mead2.gif

Kohanemisvõimelised otsimismeetodid

Kohanemisvõimeliste otsimismeetodite (*adaptive search methods*) suurim erinevus mittekohanduvatega on, et need on suutelised tulema välja lokaalsest optimumist ning jätkama

otsimist globaalselt. Näiteks geneetiline algoritm (GA), mis on tuntuim evolutsiooniline meetod (Darwin'i teooria, "parim jääb ellu"). GA on veevõrgu optimeerimisülesannete lahendamiseks kättesaadav paljudes kommertstarkvarades.

Siia gruppi kuuluvad veel:

- *Simulated Annealing* (metallurgia, karastamine), mis põhineb tõenäosusel (kuhu edasi liikuda).
- *Ant-Colony Search* (sipelgate, putukate intelligentsusel põhinev), kus "luurajad" otsivad juhuslikult ümbruskonna läbi ning seejärel annavad teistele teada, kuhu tasub edasi liikuda (nt kust võib leida süüa). Kui mingi rada aegub, siis leitakse sellele nõ parim järgmine.
- *Tabu Search* (mälu põhinev), kus hoitakse alles ka eelmisi lahendeid, mida kasutatakse lisainfona uue lahendi leidmisel. Eesmärk on lubada ainult nõ häid liikumisi (igas iteratsioonis) nii, et vältida juba uuritud kohti.

Geneetiline algoritm

Põhisammud: (1) loo juhuslik algne lahendite kogum; (2) leia igale lahendile sihifunktsiooni väärtus (*fitness*); (3) loo uus populatsioon läbi bioloogiliste seoste: taasloome (*crossover*) ning muteerumine (*mutation*); (4) leia igale uuele lahendile sihifunktsiooni väärtus; (5) lõpeta kui on jõutud varem seatud piiranguni või korda samme 3-5.

Paralleel loodusega - algne lahend koosneb nõ kromosoomidest. Kromosoom on proovilahend, mis sisaldab toru läbimõõte, karedusi, pumba käivitumise hetke jne. Vaja määrata valimi suurus (50 – 1000). Valimi liige on kui kromosoom, mida asutakse optimeerima.

Options	
Fitness Tolerance:	0.001
Maximum Trials:	10000
Non-Improvement Generations:	100
Solutions to Keep:	1
Leakage Detection Penalty Factor:	50.000

Advanced Options	
Maximum Era Number:	6
Era Generation Number:	150
Population Size:	50
Cut Probability:	1.7 %
Splice Probability:	90.0 %
Mutation Probability:	1.0 %
Random Seed:	0.500

Joonisel. Valim (population size).

0	1	1	0	1	0	0	1
g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7

Fitness = 4

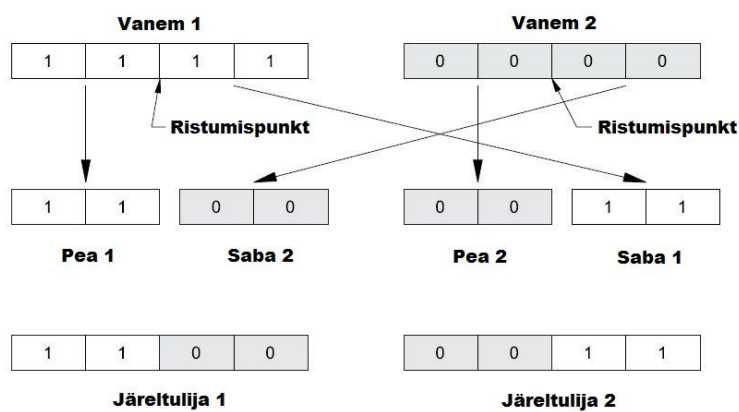
Joonisel. Kromosoom.

Järgneb evolutsioon (geneetilise materjali ülekandmine).

Vaja määrata taasloome tõenäosus ehk kromosoomide vahetamine (*cut/slice probability*).

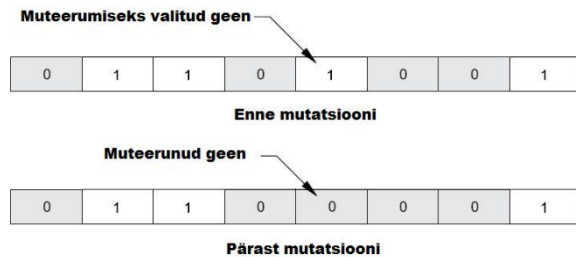
Options	
Fitness Tolerance:	0.001
Maximum Trials:	10000
Non-Improvement Generations:	100
Solutions to Keep:	1
Leakage Detection Penalty Factor:	50.000
Advanced Options	
Maximum Era Number:	6
Era Generation Number:	150
Population Size:	50
Cut Probability:	1.7 %
Splice Probability:	90.0 %
Mutation Probability:	1.0 %
Random Seed:	0.500

Joonisel. Cut/Splice või Crossover sõltub valitud GA algoritmist.



Joonisel. Kromosoomide vahetamine.

Vaja määrata ka mutatsiooni tõenäosus (kromosoomi geeni juhuslik vahetus).



Options	
Fitness Tolerance:	0.001
Maximum Trials:	10000
Non-Improvement Generations:	100
Solutions to Keep:	1
Leakage Detection Penalty Factor:	50.000
Advanced Options	
Maximum Era Number:	6
Era Generation Number:	150
Population Size:	50
Cut Probability:	1.7 %
Splice Probability:	90.0 %
Mutation Probability:	1.0 %
Random Seed:	0.500

Joonisel. Mutatsiooni tõenäosus (mutation probability).

Geneetiline algoritmi kasutamise protsessis esmalt eeldatakse lahend. Seejärel leitakse arvutatud tulemus. Leitakse sobivusfaktor (*fitness*). Sobivusfaktori põhjal järjestatakse erinevad lahendid ning koostatakse uus lahend (generatsioon). Uus generatsioon/lahend lähtub eelneva ümberkombineerimisest (*crossover, mutation*). Jätkatakse seni, kuni paremat lahendust enam ei leita või saavutatakse maksimaalne generatsioonide arv.

Sobivusfaktor mõõdab erinevust mudeli ja mõõdetud andmestiku vahel:

$$\sum_i [H_i(\text{mõõdetud}) - H_i(\text{arvutatud})]^2$$

Mida väiksem on sobivusfaktor, seda parem on lahend. Sobivusfaktorid võivad olla püstitatud erinevalt:

- Minimaalne ruutude vahe

$$F = \frac{1}{w_H} \sum [H_{\text{arvutatud}} - H_{\text{mõõdetud}}]^2 + \frac{1}{w_Q} \sum [Q_{\text{arvutatud}} - Q_{\text{mõõdetud}}]^2$$

- Minimaalne absoluutväärtuste vahe

$$F = \frac{1}{w_H} \sum |H_{\text{arvutatud}} - H_{\text{mõõdetud}}| + \frac{1}{w_Q} \sum |Q_{\text{arvutatud}} - Q_{\text{mõõdetud}}|$$

- Minimaalne halvim väärtus

$$F = \frac{1}{w_H} \max |H_{\text{arvutatud}} - H_{\text{mõõdetud}}| + \frac{1}{w_Q} \max |Q_{\text{arvutatud}} - Q_{\text{mõõdetud}}|$$

Kui palju lahendeid võib eksisteerida? Oletame, et sa tead nelja toru C väärtuste vahemikku: 60 – 100. Seega, võimalikud C väärtused on: 60, 70, 80, 90, 100. Võimalike lahendite arv: $4^5 = 1024$.

Aga kui meil oleks 10 toru? Loendamine on siin juba keeruline. Sul on mõõtmised süsteemis olevate rõhkude kohta. Kui palju unikaalseid paare saad sa tekitada tähtedest: a, b, c?

$ab\ aa\ ac\ ba\ bb\ bc\ ca\ cb\ cc = 3^2 = 9$

Sobivusfaktori tuletamise näide

2.8 [80,70,80,80]	4.2 [60,70,90,80]	5.6 [70,60,80,90]	0.8 [80,80,90,70]	2.1 [80,80,70,70]	1.6 [70,80,80,90]
			*		
			*		
			*		
0.8 [80,80,70,90]	1.2 [70,80,90,90]	0.4 [80,90,80,90]	0.1 [80,80,90,90]	0.3 [80,90,90,90]	0.9 [90,90,80,80]

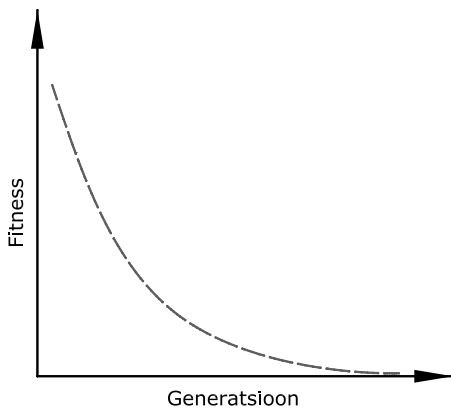
Sobivusfaktorite tasemed otsas, optimaalne lahend leitud.

Leia algne sobivusfaktor:

3.7 [80,60,70,70]	6.4 [60,70,100,90]	2.9 [70,80,80,90]	12.9 [60,60,100,70]	3.1 [80,80,80,70]	15 [60,100,100,70]
----------------------	-----------------------	----------------------	------------------------	----------------------	-----------------------

Sobivusfaktor paraneb:

2.8 [80,70,80,80]	4.2 [60,70,90,80]	5.6 [70,60,80,90]	0.8 [80,80,90,70]	2.1 [80,80,70,70]	1.6 [70,80,80,90]
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------



Joonisel. Sobivusfaktori kahanemine generatsioonide kasvamisel.

Tarkvaraliselt, kus siis GA-d kasutada soovime, peame seadistama: sobivusfaktori tolerants, maksimaalne proovimiste arv, muutumatute generatsioonide arv, talletatavate lahendite arv, sisemiste/välimate mutatsioonide arv, lahendite arv igas generatsioonis, lahendite lõikamise % (<100% - lahend jagatakse paljudeks väikesteks tükideks, avaldab mõju arvutuskiirusele), kahe erineva lahendi liitmise tõenäosus (<100% seda parem lahendite omavaheline segamine), juhuslikkuse parameeter (<100%, seda juhuslikumalt lahendiga ümber käiakse), juhuslikkust määrav parameeter esimese lahendigrupi koostamisel.

Arvutuse lihtsustamiseks kasutatakse kalibreerivate parameetrite grupeerimist (sarnase tunnuse põhjal). Sellega me piirame lahendiruumi. Gruppe saab tarkvarades tekitada: graafiliselt, valikugrupina, filtrina või käsitsi.

Optimeerimise (kalibreerimise) juures sõltume mõõtmisandmete kvaliteedist. Mõõtmisandmed võivad seega olla küsitava väärtusega. Probleemiks võib osutuda ka see, et grupid on valesti valitud, näiteks uute ja vanade torude omavaheline segamine. Lisaks võime redigeerida valet parameetrit (näiteks tarbimiste korrigeerimine aga tegelikult on C vale). Optimeerimise juures on inseneri endiselt vaja, kuna ta peab leitud tulemusi kriitilise pilguga hindama.

Mõõtmisandmete veahinnang sõltub voolukiirusest (tekkivast survekaost erinevatel tarbimisrežiimidel ja/või hüdrandi katsetel). Näiteks kui $Q = 2.5 \text{ l/s}$; $v = 0.03 \text{ m/s}$ – siis HGL on tasane.

Samas kui $Q = 125 \text{ l/s}$; $v = 1.74 \text{ m/s}$ – siis HGL on järsupoolne.

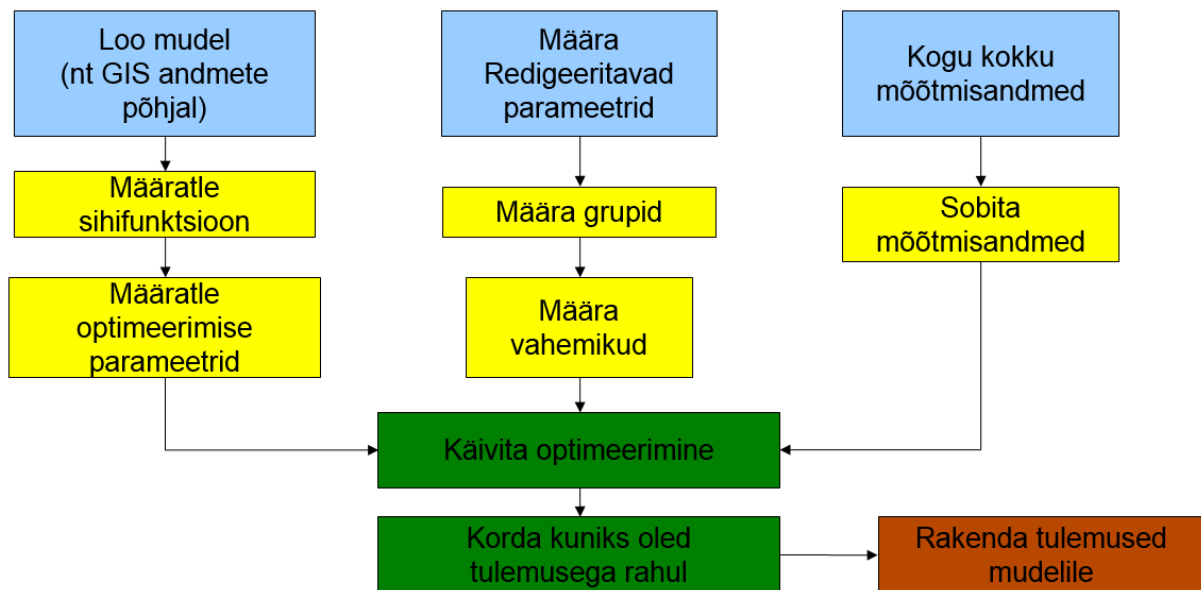
Kasutatavad mõõtmisandmed peavad olema parameetrite redigeerimise suhtes tundlikud.

$$\frac{dH}{dC} = \frac{H(\text{lähete}) - H(\text{korrigeeritud})}{C(\text{lähete}) - C(\text{korrigeeritud})} \geq 0$$

$$C(\text{korrig}) = C(\text{lähete}) - \frac{H(\text{lähete}) - H(\text{korrig})}{dH / dC}$$

$$\frac{dC}{dH} = -1.85LC^{-2.85} \left(1.86VD^{-1.16}\right)^{1.85}$$

Geneetilist algoritmi kasutatakse ka lekete otsimisel (*Darwin Calibrator*, *Bentley WaterGEMS*). Lekked peavad olema piisava suurusega, põhjustama mõõdetava survekaot, et neid oleks võimalik suure tõenäosusega leida. Meetod töötab läbi *emitter coefficient* väärtuse (võrdluseks *EPANET*). Algoritm otsib/parandab väärtust seni, kuni HGL, Q võrdsustuvad. Saab käivitada kahte moodi: (a) leia *emitter coefficient* väärtus; ning (b) leia lekke sõlmpunkt. Meetodi kasutamiseks lähtu vaid teadaolevatest/mõõdetud tarbimistest. Sul tuleb sisestada mõõdetud vooluhulgad ning rõhud. Oluline on järgida, et süsteemi poolt mõõdetud $Q >$ tarbitav Q . *Darwin Calibrator* kasutab erinevuste vahet, et paigutada leke/illegaalne tarbimine parimatesse sõlmedesse. Tegemist on tõenäoliste lekke asukohtadega.



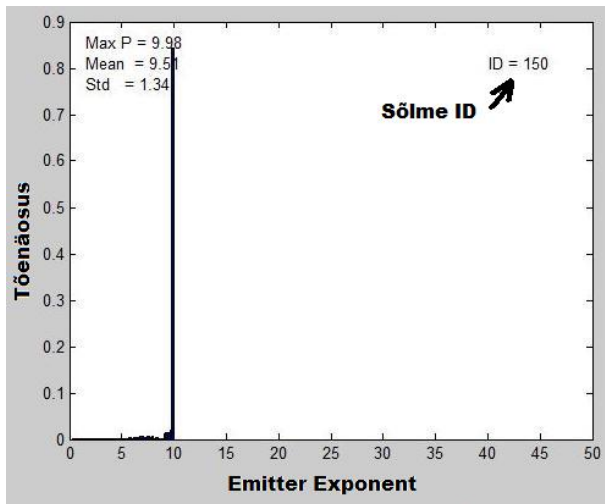
Mõned olulised näpunäited *Darwin Calibrator* kasutamiseks:

- Lekke koefitsient (*emitter coefficient*) on suurusjärgus: $- 0.1 \text{ L/s/m}^{0.5}$
- Leke peab olema piisava suurusega, et tekiks mõõdetav rõhukadu
- Vaata alampiirkondade kaupa (survetsoonid)
- Töötab paremini väiksema läbimõõduga torude puhul ($D < 300\text{mm}$)
- Lisa rõhumõõtmispunkte, et saada paremaid tulemusi
- Kasuta mõistlikku lekke kandidaatpunktide arvu (<20)
- Talleta mitu erinevat lahendit

Geneetiline algoritm on tõestanud end ka väga keerukate mittelineaarsete probleemide lahendamises. Sobib mürarohke andmestikuga töötamiseks. Suudab leida mitu lokaalset optimumi ning jõuda globaalseni. Samas olulise puudusena vajab ohtralt arvutiressurssi (globaalse optimumi läheduses töötab aeglaselt).

Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA)

Meetod kasutatud tõenäosus veevõrgu kalibreerimisel. Kalibreerimise ülesandena otsitakse igale otsitavale kõige tõenäosem suurus. Kalibreerimisülesandes otsitakse: (a) toru karedused; (b) lekkes (või tarbimised); ning (c) toru karedused + lekkes. Kasutajaliides loodud *Matlab keskkonnas (Puust, 2007)*.



Optimeerimisega seotud probleemid

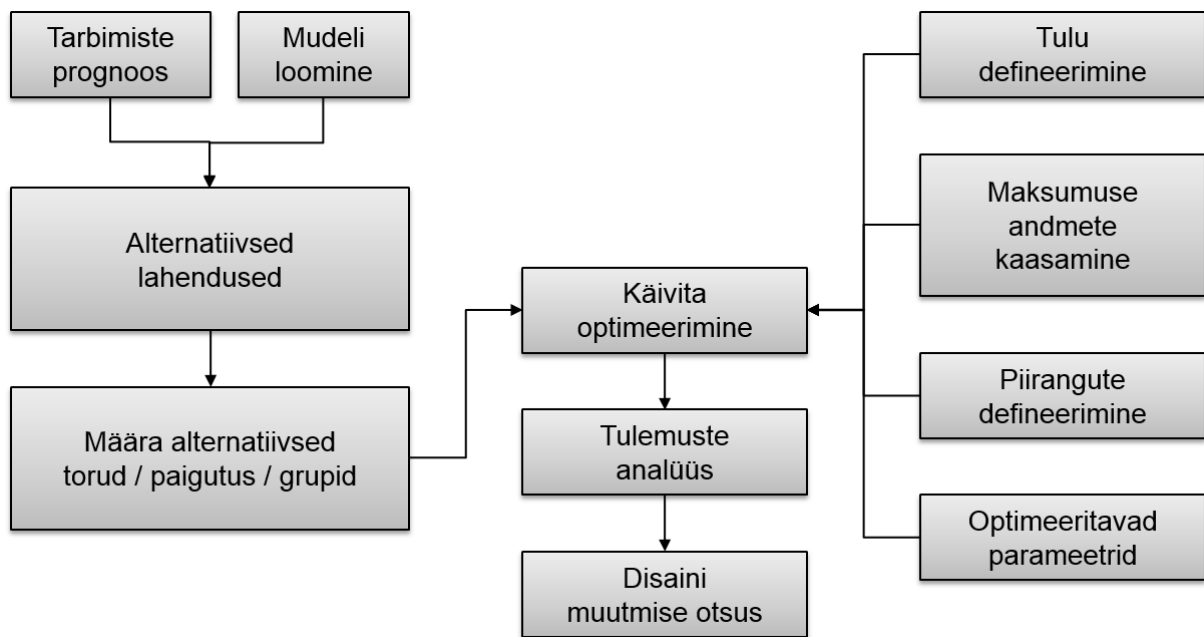
Maksumuse seisukohast võib optimaalne lahend paremuselt järgmisest lahendist erineda vaid 1-2%, samas kui toodud maksumused arvutustes on veaga ligi 20%. Optimeerimist vaadatakse seetõttu mitte alati globaalse pilguga vaid lokaalse – nt 500 mm toru maksab 10% vähem kui 600 mm toru. Kõiki ehitusmaksumusi tuleb kaasata optimaalsesse disaini (nt teekate). Ehituskeerukusest lähtuvalt võib insener omada piiratud infot kasutatavate võimaluste osas, mistõttu on ka maksumuses tehtavad vead suuremad – lahendatakse riskist lähtuvalt: 850'000 € ± 5% või 800'000 € ± 20%.

Süsteemi planeerimisel on alati ettenägematusi. Tarbimiste prognoos (lokaalne, globaalne). Uue tulekustutussüsteemi installeerimine. Ettevõtte kolimine. Tarbimiste kasv/kahanemine. Meenutame kasvõi aladimensioneeritud / üledimensioneeritud torude plusse/miinuseid. Tegemist oleks mitmesihilise optimeerimisülesandega, kus lisaks maksumusele on ka mahutavuse maksimeerimine.

Oluline on mõista, et torude läbimõõdud juhivad tarbimisi (uusi). Arendused tekivad üldjuhul kohtadesse (piirkondadesse), kust on tagatud vajalik veevajadus / mahutavus (ühendus olemasolevast süsteemist). Seega pole päris korrektne väita, et torude läbimõõtude valikul ei ole mõõdetavat efekti tarbimistele – vastupidiselt optimeerimise definitsiooniga.

Pumplate / mahutite ning reservuaaride juures tuleb optimeerida tuleb kõiki kulusid (kapitali ning jooksvaid).

Ühesihiline optimeerimine koondab kõik kriteeriumid üheks tervikuks. Mitmesihilise optimeerimise juures saadakse lahendite arvu kasv erinevate kriteeriumite omavahelise sõltuvuse tulemusel. *Pareto kõver* – ühelt lahendilt teisele lahendile üleminek ei põhjusta korraka kõikide kriteeriumite paranemist (üks küll paraneb, kuid mõni teine halveneb). Probleemide defineerimine mitmesihilisena on tegelikule olukorrale lähedasem, sest kaasatakse mitu erinevat kriteeriumit. Mitmesihilise disaini teeb keerukas asjaolu, et mõne alternatiivse lahendi eeliseid on väga raske määrata. Võimalik hinnata läbi tulekahju olukorra, mitme tarbijani (tarbimispunkti) jõuab vooluhulk (rõhust sõltuv tarbimine). Mitmesihiline optimeerimine pakub otsustajatele parema vaatenurga, mismoodi mõjutab maksumus mahutavust ja vastupidi.



Ülevaade alusdokumentidest

Ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni (ÜVK) arendamise kava

Kava koostamist korraldab kohalik omavalitsus. Koostatakse vähemalt 12 aastaks (iga 4 aastat tagant täiendatakse ja kinnitatakse uueks 12 aasta perioodiks). Enne kinnistamist tuleb kooskõlastada Keskkonnaameti ning Tervisekaitseametiga. Sisaldab ühisveevärgiga kaetavate alade ja reoveekogumisalade kaarte, dimensioneeritud vee- ja kanalisatsioonirajatiste põhiskeemi ning ühisveevärgi ja – kanalisatsiooni arendusmeetmete ajakava ning ligikaudset maksumust.

Dimensioneerimine peab sisaldama veeallikate ja veehaarete ning pumba- ja puhastusrajatiste asukohti, sanitaarkaitsealade ning rõhutsoonide ulatust ja kirjeldust. Lisaks ka tulekustutusvee saamise lahendusi ja veevõtukohti; kanalisatsioonisüsteemide kirjeldust; ülevoolu-, pumba- ja puhastusrajatiste ning purgimissõlmede ja väljalaskude asukohti ja kujasid. Ühisveevärgi ja -kanalisatsiooniga kaetaval alal peab ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni omanik või valdaja seda arendama selliselt, et oleks võimalik tagada kõigi sellel alal olevate kinnistute veega varustamine ühisveevärgist ning kinnistutelt reovee ärajuhtimine ühiskanalisatsiooni.

Perspektiivskeem, eelprojekt

Eesmärk dimensioneerida ÜVK objektid (veehaarded, veepuhastus, vee- ja kanalisatsioonivõrgud, puhastid jmt) . Esitada arendamise kava (etapiviisiline dimensioneerimine / rajamine). Võib olla iga süsteemi kohta omaette (veevarustus, reoveekanalisatsioon, sademeveekanalisatsioon). Võrkude dimensioneerimine teostatakse tavaliselt modelleerimise teel. Teostatakse erinevate alternatiivide võrdlus (mh investeering, kulutused, keskkonnamõju, poliitilised aspektid jne). Kuulub üldjuhul ÜVK arendamise kava alla (finantseerimistaotluse või muu teostatavuse uuringu tehniline osa).

Detailplaneering

Detailplaneering põhineb planeerimisseadusel. Eesmärgiks maakasutuse- ja ehitustingimuste seadmine, kujade (trassikoridoride, veehaarete) määramine, tehnovõrkude ja -rajatiste asukoha määramine (maa-ala reserveerimine). Vajalik on objektide dimensioneerimine (eriti isevoolse kanalisatsiooni sügavuse ja reoveepumplate vajaduse väljaselgitamiseks). Detailplaneeringu kinnitab volikogu, seega omab seaduse jõudu.

Põhiprojekt, tööjoonised

Eesmärgiks on anda konkreetne tehniline lahendus. Vajalik läbi viia ehitushange. Vaata näiteks riigihangete seadust ning FIDIC "Red Book" *Conditions of Contract for Construction for Building and Engineering Works Designed by the Employer* (<http://fidic.org/>). Vaata ka "Eesti Ehituskonsultantsiooniettevõtete Liit" veebilehte (<https://ekel.ee/et/>). Põhiprojekt on tavaliselt hankedokumentatsiooni osa, mis peab olema kooskõlastatud, et saaks taotleda ehitusluba.

Dokumentidena esitatakse: uuringud (geodeesia, geoloogia); liitumispunktide kooskõlastus maaomanikega (vt ka ÜVK §3); torustike trasside kooskõlastused; joonised (plaanid 1:500, pikiprofiilid, ristlõiked, sõlmede skeemid jmt); teekatte taastamise projekt; tööde tehniline kirjeldus (üldnõuded , erinõuded); tööde mahtude loetelu; kooskõlastused ja ehitusloa hanked. Põhiprojekti sisu reguleerib EVS 932.

Eelprojekt, põhiprojekt ning tööprojekt on ehitusprojekti aluseks, vaata *Riigiteataja, Nõuded ehitusprojektile* (<https://www.riigiteataja.ee/akt/118072015007>).

EVS standard EVS 921:2022 (Veevarustuse välisvõrk)

Sisaldab nõudeid ühisveevärgile. Annab juhiseid ühisveevärgi projekteerimiseks (veetarbimine, vabasurved, varumahutite dimensioneerimine, tuletõrjevee vajadus). Kirjeldab konstruktsioonilist veevajadust (torustikusisesed ja -välised jõud). Seletab lahti mõned olulised veevõrguga seotud terminoloogia/mõisted. Juhised reservuaaride (varumahutite) projekteerimiseks, pumplate töökindluse klassifikatsioonid. Kirjeldab ühisveevärgi paigaldamist ning torustiku katsetamist (surveproov).

Referentsid

Pildimaterjal

- Ref #30 Kasutatud referentsina pilti raamatust: Pressure zone topographic map, Advanced Water Distribution Modeling and Management, lk 366. Haestad Methods, 2003.
- Ref #31 Toote info, Dual Setting Pressure Reducing Valve - Depends On Flow Rate (MODEL 132-080), www.balem.com
- Ref #32
- 1) <http://www.allenkindernbeideeltern.de/images/grandma.jpg>
 - 2) <http://www.fastcharacters.com/character-design/cartoon-business-man/>
 - 3) <http://conceito.de/wp-content/uploads/2011/08/relatorio-tecnico.jpg>
 - 4) Surgeon, http://www.hasslefreeclipart.com/cart_people/images/surgeon.gif
 - 5) http://dyvigdevelopments.com/yahoo_site_admin/assets/images/cartoon_construction_worker.68144651_std.gif
 - 6) http://www.esec-odivelas.rcts.pt/Situacao_emergencia/fireman-cartoon.gif
 - 7) Engineer Cartoon Plans Site, http://www.clker.com/cliparts/9/7/f/7/1194984625160615144architetto_francesco_ro_01.svg.med.png
- Ref #33 George F. Mobley, Indian Holy Man, <http://photography.nationalgeographic.com/staticfiles/NGS/Shared/StaticFiles/Photography/Images/POD/i/indian-holy-man-110326-sw.jpg>
- Ref #34 Simiprof, Nelder Mead, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Nelder_Mead2.gif

Artiklid

Vassiljev A., Koppel, T., Puust R. Calibration of the model of an operational water distribution system. Proceedings of CCWI 2005, Exeter, UK.

Puust, R. Probabilistic Leak Detection in Pipe Networks Using the SCEM-UA Algorithm, TUT Press, 2007.