

# Mudelite kalibreerimine

## Sisujuht

Sissejuhatus .....	2
Modelleeritud vs mõõdetud andmed .....	3
Veaallikad modelleerimises.....	4
Kalibreerimise meetodid .....	10
Manuaalne kalibreerimine .....	10
Automaatne kalibreerimine .....	12
Probleemid kalibreerimises.....	14
EPS mudeli kalibreerimine.....	17
Veekvaliteedi mudelite kalibreerimine .....	18
Kalibreerimise normid .....	19
Referentsid .....	20

## Sissejuhatus

Ehkki vajalik informatsioon on kõik kokku kogutud ning sisestatud hüdraulilisse modelleerimis-tarkvarasse, ei saa modelleerija kunagi eeldada, et matemaatiline esitus ongi täpne esitus. Tarkvara lahendab lihtsalt võrrandite süsteemi – pidevusvõrrand ning energia jäävusseadus, kasutades olemasolevat andmestikku – seega andmestiku kvaliteet dikteerib tulemuse täpsuse. Hüdraulilise mudeli täpsus sõltub, kui hästi on see kalibreeritud. Kalibreerimine on vajalik, kui mudelit kasutatakse otsuste tegemiseks. Kalibreerimine on protsess, mille käigus võrreldakse mudeli poolt saadud tulemusi võrgus mõõdetud tulemustega, vajadusel muudetakse seejärel mudeli andmeid kuniks mudeli poolt leitud tulemused ühtivad mõistliku vea piires mõõdetud tulemustega. Kalibreerimine tähendab teatud parameetrite muutmist mudeli juures: tarbimised, tarbimisgraafiku koefitsiendid, toru karedused, pumba karakteristikud jm mis kõik mõjutavad otseselt simulatsiooni tulemust.

Kalibreerimine on oluline järgmistel põhjustel:

- Usaldatavus – tulemusi, mida arvutimudel esitab kasutatakse otsuste tegemisel, et parandada hüdraulilise süsteemi töökindlust ning opereerimist. Kalibreerimine esitab mudeli võime taasesitada olemasolevad tingimused, tõstes samal ajal usaldatavust, mida insener saab mudeli kasutamisest, et hinnata olemasoleva süsteemi tööd.
- Mõistmine – kalibreerimise protseduur tervikuna annab suurepärase ülevaate hüdraulilise süsteemi tööst. Teisisõnu näitab see, millised sisendväärtused on mudeli seisukohalt kõige tundlikumad, nii et modelleerija teaks, kus peab ta olema ettevaatlikum parameetrite hindamisel. Süsteemi paremaks mõistmiseks peab modelleerijal olema ettekujutus võimalikest tagajärgedest, kui erinevad täiendused ning opereerimise tingimused muutuvad.
- Vea otsimine – üks kalibreerimise olulisusi, mida tihtipeale alahinnatakse, on hinnata puudulikku või valet andmestikku süsteemi kirjeldamisel – näiteks toru läbimõõdud, puuduolevad torud, suletud klapid. Seega pakub kalibreerimine leida üles need vead, mis on tekitatud kogemata modelleerimise käigus.

## Modelleeritud vs mõõdetud andmed

Selleks, et teha võrdlust mudeli ning mõõdetud tulemuste vahel, peab kasutaja olema veendunud, et andmestik on õige ning kasulik. Vaatamegi lähemalt kalibreerimise seisukohalt olulist andmestikku. Kui võrdlused viiakse läbi mõõdetud ning arvutatud tulemite vahel, siis matemaatiliselt pole mingit vahet, kas kasutada rõhkusid või surveid. Kuna rõhk on lihtsalt konverteeritud kõrguse esitus samarõhujoonest (*HGL – hydraulic grade line*), mis on võetud maapinna suhtes – seega on need sisuliselt võrdväärised. Kalibreerimise seisukohalt on aga mitmeid olulisi nüansse, miks peaks töötama survetega ning mitte rõhkudega. Surve pakub modelleerijale suuremat täpsust, ning andmestiku usaldatavust. Kui arvutatud ning mõõdetud surved on oluliselt erinevad üksteisest, siis peaks see andma modelleerijale kohese märguande, et esitatud väärtus pole õige. Näiteks on maapind sisestatud valesti. Surve esitab alati ka voolusuuna, samas rõhk ei pruugi seda alati välja näidata. Töötades survetega, on mõõtmistulemustega lihtsam töötada (nt rõhk on vaja konverteerida surveks).

Ehkki *HGL* ja rõhkude vahelised võrdlused viivad täpselt samadele tulemustele, kui teised algandmed on samad, on rõhkude võrdlemisel leida vigu oluliselt lihtsam. Samas on keeruline leida ebakooskõlasid mõõdetud ning arvutatud väärtuste vahel. Seega peaks esimene samm olema see, et rõhud ning mahutites mõõdetud rõhud peaks konverteerima surveteks. Ning edasised võrdlused peaksid läbi viidama mõõdetud ning arvutatud survete (*HGL*) vahel.

Vead kareduskoefitsientides ning tarbimistes mõjutavad samarõhujooone nurka/kallakut, kui andmed koguda piirsõlmede lähedal. Kui andmeid koguda piirsõlmede lähedal, siis erinevused mudeli ning mõõdetud andmete vahel võib olla väike, kuna tegemist on väikeste vahekaugustega, samas *HGL* nurk võib omada märgatavat viga (toru kareduse ning tarbimiste tõttu). Surve andmestik tuleb alati koguda teadaolevate piirsurvetest piisavalt eemal. Ning andmestik tuleb koguda neilt torudelt, mida hilisema skeletoniseerimise käigus ei eemaldata. Igas survetsoonis peaks läbi viidama vähemalt üks vooluhulga test. Üldjoontes peaks vooluhulga testide arvu valima proportsionaalsena survetsooni suuruse järgi. Asukohtade valikuga püütakse vähendada ebakindlust mudeli arvestamistes. Mitmeid algoritme on välja töötatud selleks, et leida parim mõõtepunktide asukoht (näiteks geneetiline algoritm). Vooluhulga testid tehakse tavaliselt hüdrantidega. Andmete kogumist võib vaadata lihtsa tulemi võtmisena või katkematu monitooringuna. Üksik tulemi võetakse võrgust kindlal ajahetkel, samas katkematu monitooring tähendab, et tulemeid saab katkematult ajaperioodi vältel. Kui räägime üksikust tulemist, siis seda peab koguma kohtadest, kus mõõdetav parameeter on stabiilne ning esitatav mõõttulemi on konstantne suhteliselt pika perioodi lõikes. Selleks, et katkematut monitooringut efektiivselt kasutada, peab asukoht olema valitud nii, et mõõdetav parameeter oleks dünaamiline (ajas muutuv). Juhul kui kasutatakse üksikmõõtmist dünaamilises punktis, peab kindlasti ära märkima, mis ajahetkel see võeti ning ka sellega seotud piiritingimused.

## Veaallikad modelleerimises

Peamine eesmärk on saada reaalselt süsteemi käitumist esitav mudel. Ehkki meil võib olla olemas süsteemi kirjeldav täpne mudel, on üsna tõenäoline, et paratamatult ei klapi meie rõhud ning vooluhulgad täpselt. See on tingitud asjaolust, et teatud matemaatilised eeldused on kasutusel simulatsiooni tarkvarades, samas on nende eesmärk anda ka tähendusega ning kasulikku infot. Mõned võivad eeldada, et kalibreerimine – see on toru siseläbimõõtude või sõlmede tarbimiste hinnangute parandamine, kuniks mõõdetud ning arvutatud rõhud ja vooluhulgad on omavahel kooskõlas. Teisalt on see tingitud asjaolust, kus me eeldame, et torude pikkused, diameetrid ning mahutite veetasemed on otseselt mõõdetavad, samas kui toru karedus ning tarbimine hinnatud, ning seega peaksimegi viimaseid parandama. Samas võivad erinevusi põhjustada mõõdetud ning arvutatud tulemuste vahel mitmed teisedki faktorid (Walski, 1990).

Kokkuvõttes, mistahes andmestikku, mis sisaldab teatud ebamäärasust, on kalibreerimise kandidaat ja seda asjaolu ei saa alahinnata. Lisaks võib kalibreerimise protsessi mõjutada ka süsteemis olevad piirsituatsioonid (probleemid). Süsteemi põhjalik järgimine peaks olema eelnevalt tehtud, enne kui asutakse tegema muudatusi mudelitesse. Mõned võimalikud süsteemi probleemid on: suured lekked, registreerimata tarbimised, vead mõõdetud tarbimistes ja väljavõtted torude läbimõõtudest, suletud klapid, ebaefektiivsed pumbad, ehitusjätmed torudes).

Veaallikad võib jagada kahte peamisse gruppi: (a) sisestamisest tingitud vead; (b) mõõtmisvead.

Esimest võib neist olla parandada suhteliselt lihtne, samas on neid ka väga raske leida (näiteks toru pikkus 2250 m, sisestatakse kogemata kui 250 m). Siiski on tänapäeva tarkvaradesse sisse ehitatud moodulid, mis võimaldavad sisestamisest tingitud vigu leida ning parandada. Kõige lihtsam näide, kus toru pikkus arvutatakse välja kahe otspunkti koordinaatide järgi. Samas tasub meeles pidada, et need ei eemalda võimalust, kus inimese poolt tekitatud viga on võimatu. Üks meelespeasid on kasutada peale sisendandmete sisestamist mõnda graafilise liidest, järjestada erinevate parameetrite järgi, leidmaks liialt suuri või väikeseid sisendeid (toru pikkused, diameetrid, karedused). Võrreldes sisestamisest tingitud vigasid mõõtmisvigadega, on viimaseid oluliselt keerulisem leida ning parandada. Näiteks, kui peame sisse lugema torude andmestiku kaartidelt, siis seal tehtud mõõtmisviga võib põhjustada olulise erinevuse tegeliku toru pikkuses. Sõltuvalt mudeli eesmärgist, võib selline täpsusklass olla piisav või ebapiisav. Mudeli kasutamise otstarve määrab, kui suur täpsus peab olema meie andmetes.

Toru nominaal- ning tegelik läbimõõt on tavaliselt erinevad. Nominaalläbimõõt on toru üldine "nimetus", nt DN400 toru. Siseläbimõõt võib erineda tööstusstandarditest tingituna, enamasti uusi torusid omavad siseläbimõõde, mis on suuremad kui nominaalsed diameetrid (tegelik ja täpne mõõt sõltub samuti rõhuklassist). Tegelik diameetri kindlaks tegemist raskendavad asjaolud, et korrosioon sõltub toru paigaldusaastast ning lisaks võib toru läbimõõt olla erinev terve pikkuse ulatuses. Seega kasutatakse tavaliselt toru nominaalläbimõõde ühes toru kareduse koefitsiendiga, mida reguleeritakse ajas muutuvana. Kui kasutusel on toru nimiläbimõõt (nominaal-), siis tuleb olla ettevaatlik kareduste sisestamisel, sest nimiläbimõõt uuel torul on tavaliselt väiksem kui toru tegelik läbimõõt (sõltub materjalist ning survetugevusklassist) – sellisel juhul tuleb karedust  $H-W$  korral suurendada ning  $D-W$  korral kasutada miinusega kareduskoefitsienti.  $H-W$  valemi juures omab toru diameetri täpsus suuremat rolli kui toru karedustegur (astmefunktsioon). Üldiselt on kalibreerimise eesmärk vähendada parameetrite hulka, mida redigeeritakse. Seetõttu jäetakse toru läbimõõt välja ning mängitakse vaid ühe toru karakteristikuga – karedusega. Toru, mille  $D = 150$  mm ning karedustegur 100 annab sama tulemuse, mis toru  $D = 130$  mm ning karedus 161.

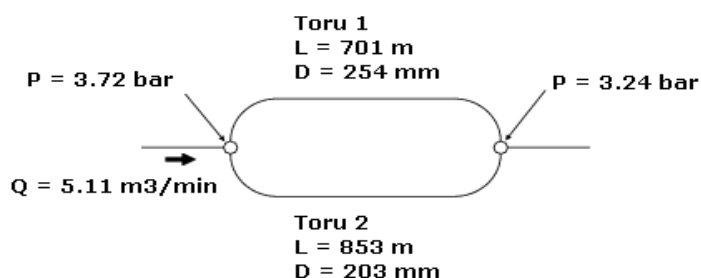
$$h_L = f \frac{Lv^2}{D2g} = \frac{8fLQ^2}{gD^5\pi^2} \qquad h_L = \frac{C_f L}{C^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852}$$

Lisaks aitavad karedustegurid avastada teatud teisi probleeme, näiteks kui C väärtus on liiga väike (40) või liiga suur (150), siis võib olla see tingitud asjaolust, et mõni osaliselt suletud klapp eksisteerib süsteemis.

Kirjandusest võib leida erinevaid seoseid sisekareduste ning vanuse / kvaliteedi / materjalide / diameetrite vahel. Näiteks on leitud, et veekvaliteet võib mõjutada toru efektiivset läbimõõtu sõltuvalt vooluhulgast (voolukiirus võib mõjutada settimisprotsesside kiirust), mis seda toru on aja jooksul läbinud (efektiivne toru läbimõõt vs toru vanus). Efektiivne toru läbimõõt on toru siseläbimõõt, millest on maha arvestatud toru karedus (settekihi paksus).

Vaatame ühte lihtsat näidet, kus tegemist on paralleeltorustikuga, mille karedused on teadmata. Olemas on aga rõhumõõtmised (maapinnad samad). Lisaks on teada vooluhulk, mis süsteemi läbib ning samuti on teada, et rõhukaod on identsed.

$$\frac{L_1}{D_1^{4.87}} \left( \frac{Q_1}{C_1} \right)^{1.852} = \frac{L_2}{D_2^{4.87}} \left( \frac{Q_2}{C_2} \right)^{1.852}$$



Toru 1		Toru 2	
C	Q	C	Q
80	2.50	166	2.61
90	2.81	146	2.30
100	3.12	126	1.99
110	3.44	106	1.67
120	3.75	86	1.36
130	4.06	66	1.05
140	4.38	46	0.73

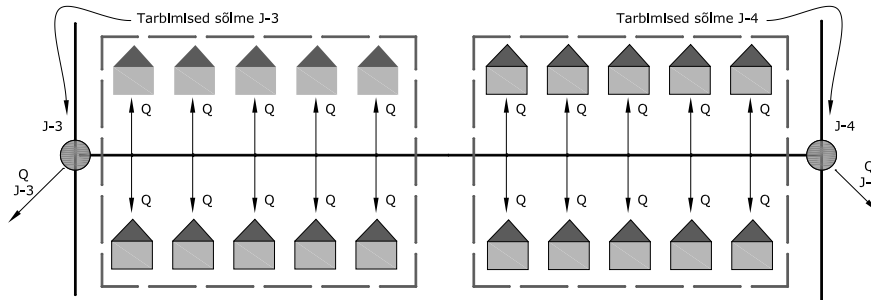
Eeldasime "Toru 1" karedust, leidsime "Toru 1" vooluhulga. Arvutame "Toru 2" vooluhulga ning leiame "Toru 2" kareduse. Näeme, et lahendeid on mitu, samas kindel valik eksisteerib. Mis on õige C? Ühes torus tuleb mõõta vooluhulk, et seda teada saada.

Nüüd aga mõtle ülesandele, kus nii vooluhulk kui ka rõhk lähtepunktis on teadmata. Sellisel juhul eksisteerib lõpmata hulk Q, C ning P väärtusi, mis viivad mõõdetava rõhu väärtuseni lõpp-punktis. Kui lisada aga veel paralleeltorusid, siis tõuseb ülesande keerukus veelgi. See lihtne näide illustreerib, et vead võivad olla peidetud kujul. Kui aga probleemid on suuremad ning mõõteandmed on harvemad, siis lisab see keerukust aina juurde.

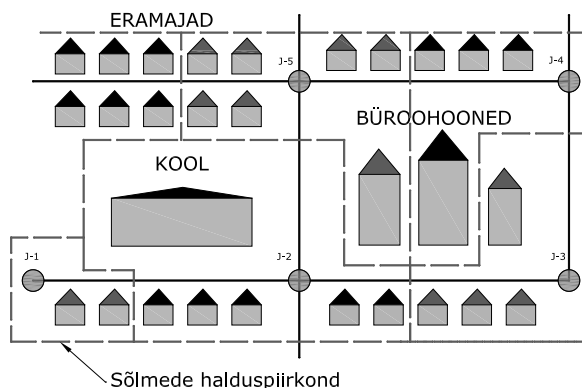
Vähendamaks vigasid C väärtustes, tuleks teha survemõõtmised erinevatel tarbimistel. Kuna rõhukaod arvutamise valem on mittelineaarne, siis on väga raske vigu kompenseerida ning lasta mudelil välja paista kalibreerituna, ehkki ta seda pole. Vooluhulga mõõtmine elimineerib ühe vabadusastme, samas pole seda praktiline teha iga toruga. Kohustuslikud punktid, kus peaks vooluhulka mõõtma on: peatorud, mis lähtuvad veepuhastusjaamast; pumbajaamad; mahutid; reservuaarid ning teised veeallikad.

Lisaks peaks vooluhulgamõõtmised olema tehtud ka peatorudel, kust lähevad läbi suured vooluhulgad (protsendiliselt).

Modelleerimises tehakse üks oluline lihtsustus – tarbimist eeldatakse sõlmpunktis, tegelikult on aga tarbimine üle terve toru pikkuse. Teisisõnu tarbimine jaotatakse ümber. See ümberjaotamine on samuti üheks vea põhjustajaks, mida tuleb kalibreerimisel arvestada. Veelgi enam, tarbimised muutuvad ajas ning see peab olema tarbimiste ümberjagamisel samuti teada. Miks me siis ei pane sõlme igasse tarbimispunkti? See kasvatab torude arvu ning seega tõstab ka kompleksust.



Tarbimised tuleb ära jaotada nii, et: (1) summaarsed tarbimised üle terve süsteemi ning igas survetsoonis oleksid vastavuses tootmisandmetega; (2) tarbimise jaotused peavad andma tegelikule tarbimisele ligilähedased tulemused. Kui tarbimised jaotada õigesti, siis ei muutu meie lõpptulemus ka sellest, kui püüame vähendada kompleksust, eemaldades näiteks toru, millelt enam tarbimisi ei võeta. Samas tuleb alati meeles pidada, et simuleeritud rõhud süsteemi sõlmedes on vaid lähendid neile rõhkudele, mis on kodudes, büroohoonetes. Üldiselt võib öelda, et tarbimiste paigutamine õigesti sõlmpunkti (kui ei oska kahe vahel valida) ei põhjusta suuri erinevusi rõhu väärtustes. Samas, kui meil on tegu tarbijaga, kes on selles piirkonnas suurtarbija, siis rõhuerinevus siiski võib eksisteerida. Juhul, kui mängu tulevad veel tulekahju kustutusveed, siis seda enam on tarbimise vooluhulkadel oluliselt väiksemad mõjud. Tuleb meeles pidada, et meie mudelites peavad olema kõik andmed võetud ühel ja samal ajahetkel. Tarbimised peavad olema selle perioodi kohta, kui teostame mõõtmisi. Üks levinumaid vigu on see, kus mudelist võetakse keskmine surve ning võrgus mõõtmistes mingi kindel tund, mis võib olla oluliselt suurem (või väiksem) keskmisest väärtusest – tipptarbimine.



Süsteemi tarbimisandmetesse tuleb samuti kriitiliselt suhtuda (nagu ka vooluhulgad). Kontrollima peab erinevatel ajahetkedel võetud andmeid. Kui neis on suured erinevused, siis peab leidma sellele loogilise põhjuse – nt tulekahju?

Mudelite koostamisel kasutatakse erinevat liiki süsteemi kaarte (GIS) – ning nendel olevat infot tuleb hoolikalt uurida / kasutada. Me ei saa eeldada, et seal olev info on korrektne. Tuleb küsida, millal viimati seda uuendati? Samas võib leida andmebaase, mida hoitakse korrastatuna ning mille põhjal luuakse pidevalt mudeleid, et kontrollida nende vastavust. Juhul kui selgub, et kalibreerimise käigus

on liialt suured erinevused toru karedustegurites (väiksem kui 30 ning suurem kui 150), siis võib olla selle põhjustaks näiteks mõni klapp, mis võib osalt olla kinni. Näiteks oletame, et mõõdetud rõhk on 14 m suurem kui simuleeritud, sõltumata toru karedustegurist. See näitab selgelt, et mudeliga on probleemid. Näiteks võib olla, et toru, kus mõõtmised tehti, ei asu mudelis, või on sõlme kõrgusmärk vale. Kui aga kahtlustatakse torude omavahelist ühendust, siis peab seda kontrollima lähteandmebaasidest või kaartidelt. Samuti kontrollima süsteemis olevate klappide hetke seis. Võib-olla tuleb selleks üles otsida arhiivis vedelevad vanad kaardid.

Põhjuseks võib olla ka ajutine ääritingimuste muutmine. Näiteks oletame, et rõhumõõtmised on võetud kell 06, 10, 12, 15, 19. Kuna tarbimised, mahutite veetasemed, klapi seaded, pumba seaded, torude kinni/lahti seisund võib ajas muutuda, siis saadakse iga kord üks unikaalne ääritingimuste grupp, mis peegeldub otseselt mõõtmisandmetes vastavatel kellaaegadel. Antud juhul on meil tegu 5 erineva statsionaarse simulatsiooniga iga süsteemi tingimuse kohta, kui rõhud mõõdeti. Kui viiakse läbi hüdrandikatseid selleks, et koguda kalibreerimiseks vajalikke andmeid, on soovitatav, et keegi võtab üles pumplates nii eelsurve kui sisse antava surve, eel- ning järelsurved rõhualandusklappides – sellisel juhul on võimalik määrata, kas rõhulangus oli tingitud toru karedusest, pumba tööpunkti nihkest või rõhukaost, mille põhjustas rõhualandusklapp. Mitte alati ei saa me usaldada SCADA andmeid selles osas, kuna see ei pruugi anda andmeid kõikide elementide kohta süsteemis samal ajal (näiteks puudub pumba andmed). Ääritingimused peavad olema selgelt määratud igal ajahetkel, kui mõõtmisi teostatakse. Ääritingimused (pumpad, mahutid jt) peavad olema üles mõõdetud sama täpsusega, mis ka teostatavad rõhumõõtmised.

Mudeli skeletoniseerimine võib eemaldada elemente, mis ei oma süsteemile kui tervikule olulist mõju. Samas ei tohi skeletoniseerida mudelit lähtuvalt selle ühendustest ringistuste näol (on erandeid). Pea meeles, et skeletoniseerimisel on teatavad piirid, kust edasi minnes kaotame kalibreerimistäpsuses. Tihtipeale kasutatakse mudeli skeletoniseerimist selleks, et viia läbi mudeli arvutused. Ideaaljuhul peaks skeletoniseeritud mudel pakkuma lihtsamat, kuid täpset süsteemi taasesitust.

*“Everything should be made as simple as possible but not simpler“  
Albert Einstein (1879 - 1955)*

Geomeetrias võivad samuti esineda anomaaliad. Sõlmede ja torude ühendused, mis tulevad andmebaasidest (GIS). Ühendades sõlme toruga, kus see tegelikkuses ei asu (torud lõikuvad eritasapindadel – jooksevad teineteisest üle) põhjustab probleemseid situatsioone. Tuleks vältida (või olla äärmisel ettevaatlik) automaatseid ühendusprotseduure mudelite loomisel.

Pumba karakteristikud kõverad on tihtipeale saadud interpolatsiooni teel. Samas ei arvestata pumba amortisatsiooniga. Seega tuleb kontrollida pumba tootja ja mudeli (tegeliku pumba) kõverat omavahel. Pumba karakteristikud muutuvad aja jooksul. Tootja karakteristikliku kõvera kasutamine kogu pumba eluea vältel pole korrektne – sest selle aja jooksul vahetatakse näiteks pumba tööraatid, mis sisuliselt määravadki karakteristikud pumbale. Pumba karakteristikuid tuleb kontrollida jooksvate testide käigus.

Ükskõik kui häid töövahendeid me kasutada saame, kalibreerimine on tihtipeale kui üks suur jälgede taga ajamine, kaasates veidi intuitsiooni ning kübeke õnnegi. Võiks justkui arvata, et kalibreerimine on oma olemuselt ülimalt lihtne. Tuleb lihtsalt leida vastus küsimusele, mis on kalibreerimata mudelis valesti, parandada viga ja 'heureka'. Samas tuleb tõdeda, et meil on sisuliselt võimatu öelda, miks mudel nii-öelda valetab, kuna neid faktoreid on väga palju, mis teeb mudelist ebatäpse mudeli. Seetõttu on nii mõnelgi juhul vajalik kulutada tohutult aega ja muid ressursse, et leida probleemile lahendus teatud usaldusväärsusega. Kalibreerides me üsna tihti räägime toru karedustest. Ja keskendame probleemi toru kareduste otsimisele. Tegelikkus on aga see, et kareduse kõrval võib eksisteerida väga palju teisi vigaseid andmeid, sisestusi, nüansse. Võtame kasvõi kaartidelt info

lugemise. Kas kaks ristuvat joont tähendavad ilmtingimata ka hüdrauliliselt ühendatud torusid? Vaatame kasvõi näiteks GIS temaatikaga seotud õppematerjali.

Teiselt poolt. Kuidas läheneda toru kareduse suurenemisele toru vananedes. Kas ja kui palju toru karedus muutub? Torusid pestakse (survepesu), kas ja kui palju see konkreetse toru siseläbimõõtu taastas? Seega me ei saa ilmtingimata eeldada, et näiteks 50 aastat vana toru on paremas seisus kui 80 aastat vana toru. Me eeldame (teeme detektiivitööd), et see nii võiks olla aga tegelikult?

Reaalses võrgus on väga ja väga palju siibreid, mis võivad olla avatud/suletud või osaliselt avatud. Iga kord kui süsteemi operaator avab/sulgeb siibri, peaks vastavasisuline märge ka nii-öelda päevikusse ja GIS süsteemi minema. Tegelikkus on aga see, et me kõik unustame või kasutame erinevaid andmebaase info haldamisel ja ühel hetkel enam ei tea, milline neist on õige. Siibri vale oleku kaasamine mudelis võib aga viia olukorrani, kus me ei leiagi head lahendit.

Me võime kasutada ülitäpseid andureid, et mõõta rõhku/vooluhulka/veetaset aga unustame ära selle, et nende paigutuse/kõrgusmärgi oleme lugenud mõnest olemasolevalt paberilehelt ning võtame seda kui absoluutset tõde. Aga kui anduri kõrgusmärgi mõõtmisel tehti väike apsakas? Siis mis kasu on nendest ülitäpsetest mõõtmisandmetest?

Oletame, et mudel annab suuremad surved kui mõõdetud. Seega, peame survekadusid mudelis suurendama. Võibolla aga põhjustab seda olukord, kus mõni klapp on mudelis avatud aga tegelikult suletud? Katsetame. Ei õnnestu. Äkki mõni lähedal olev toru on tegelikult suletud? Katsetame. Ikka ei õnnestu. Aga äkki jõuab vesi mõõdetavasse punkti mööda teist rada (näiteks suletud ei ole mitte väiksema läbimõõduga toru aga suurema läbimõõduga toru)? Ehk siis kokkuvõtvalt, mudelis me eeldame, et voolamine justkui toimub kõige lühemat teed pidi aga tegelikkuses võivad olla siibrite asenditega tekitatud totaalselt teine olukord, millest meil pole olemasoleva info baasil aimdust.

Mudelid on üldjuhul tegelikkuse lihtsamad peegeldused. Seda ka torude arvu mõttes. Samas ei saa me eeldada mudeleid lihtsustades, et näiteks alla 75 mm läbimõõduga torud on ebaolulised. Tegelikkuses võivad need olla osa ringistusest, mis mõjutavad oluliselt rõhkude kokkulangevust mudeli ja tegelikkuse vahel.

Tarbimiste paigutumine. Kas oleme tarbijad õigetes tarbimispunktidest liitnud? Kas me tegelikult ka oleme iga tarbija kohta teadlikud, mismoodi on ta süsteemiga ühendatud? Ilmselt projektjoonistest saaksime seda teada. Aga rekonstruktsiooni käigus võidakse olla tehtud ikkagi muudatusi. Seega me jälle eeldame. Näiteks eeldame, et tarbija asub temale lähimas sõlmes. Kõik sellised eeldused võivad aga põhjustada erinevusi rõhkude võrdlemisel. Ennekõike suurtarbijate korral.

Survealandusklappide olemasolu mudelites. Kas on õigesti reguleeritud? Kust pärineb info surveklappide seadete kohta? Kas neid on aja jooksul muudetud? Ebaõigete sätete kasutamine kaasab vead, millest on raske lahti saada.

Tarbimisgraafikute täpsus ning keskmise tarbimise mõiste. Aga ka tarbimiste rõhust sõltuv käitumine. Me sisestame mudelisse keskmise tarbimise aga tegelikult ei pruugita seda vooluhulka kätte saadagi kui süsteemis on nii-öelda tipptarbimine ning vabasurvega on kitsas käes. Meie tarbimine on tegelikkuses jagatav kaheks alamliigiks. On rõhust sõltuv tarbimine (nt veekraan, dušš) ning mahust sõltuv tarbimine (nt pesumasinat väga ei huvita, mis see surve hetkel on, lihtsalt vee võtmiseks läheb üks kord rohkem aega ja siis jälle vähem aega). Kui palju mõjutavad sellised keskendamised mudeli täpsust? Taas jällegi eeldame aga tegelikkus võib olla midagi muud. Alati ei pruugi olla toru karedus, mis on vale, vaid ongi vaja redigeerida mõnda muud sisendparameetrit.

Pumba töögraafikute täpsus. Me eeldame, et need on samad, mis uute pumpade graafikud. Tegelikuses aga ei ole. Amortisatsioon. Peaksime üle mõõtma.



Kokkuvõtvalt peavadki modelleerijad olema kui detektiivid, et leida võimalikke probleemide allikaid, miks mudel ei kattu tegelikkusega. Meetodid ja viisid on kõigil erinevad. Seega väga lollikindlat kalibreerimise kokaraamatut on väga raske välja töötada, mistõttu ongi need üldisemat laadi, jättes ruumi ka asjadele loovalt läheneda, mis tulemuseni viiks.

## Kalibreerimise meetodikad

Kalibreerimine on kahe astmeline: (a) üldine kalibreerimine ehk makrokalibreerimine; ning (b) täppis-kalibreerimine ehk mikrokalibreerimine. Suurte lahknevuste kindlaks tegemine ning määratlemine on kalibreerimise juures üks esimesi samme. Seetõttu nimetatakse seda ka nn makrokalibreerimiseks. Selle ülesanne on vähendada mõõdetud ning arvutatud parameetrite vahet. Peale suurenevuste eemaldamise, võime alles fokuseerida toru karedusteguri ning tarbimiste kalibreerimise juurde – see on ka viimane etapp kalibreerimise juures. Üks olulisemaid nüansse selle juures on, mismoodi me teeme otsuseid, et mudelit viia kooskõlla reaalsusega? Välja on pakutud seitsme sammuline lähenemisviis:

1. Määratle mudeli kasutusvaldkond (sellega pannakse paika mudeli detailsus, tolerantside piirid mõõdetud vs arvutatud)
2. Määra mudeli parameetrid hinnangute põhjal (andmete kogumine infobaasidest)
3. Kogu kokku kalibreerimiseks vajalik andmestik (andmete kogumine reaalselt võrgult)
4. Leia mudeli tulemid hinnangute põhiselt (esmane mudeli arvutus)
5. Vii läbi makrokalibreerimine (suurte vigade parandamine)
6. Vii läbi tundlikkuse analüüs (näiteks kui 10% muutus kõikide toru karedustes ei anna muutust rõhkudes, siis järelikult pole toru karedused tundlikud süsteemi muutustele selle hetke tarbimistele; kas 15% muutus tarbimistes annab erinevuse rõhu ja vooluhulga andmetes? – kui jah, siis tasub pöörata rõhku just nende andmete parandamisele, kui ei – siis tõenäoliselt on süsteemis väga väikesed voolukiirused, ning kättesaadav andmestik pole antud mudeli jaoks kasulik)
7. Vii läbi mikrokalibreerimine – kõige aeganõudvam, eriti siis kui meil on tegu suure arvu torudega/sõlmedega, mis kõik on kalibreerimise kandidaadid – lisaks arvestades veaallikaid, võib kalibreerimine veelgi keerulisemaks osutada.

Kalibreerimismetoodikad võib jagada kahte leeri: (a) manuaalne ehk käsitsi kalibreerimine; ning (b) automaatne kalibreerimine.

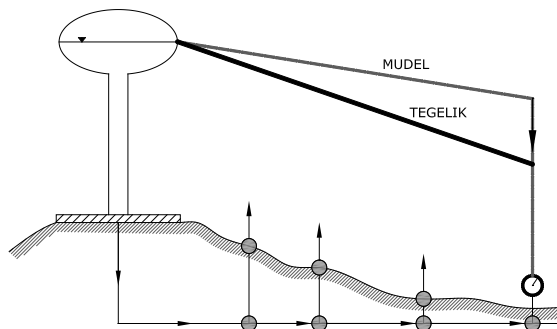
### Manuaalne kalibreerimine

Manuaalse kalibreerimise 4 põhisammu:

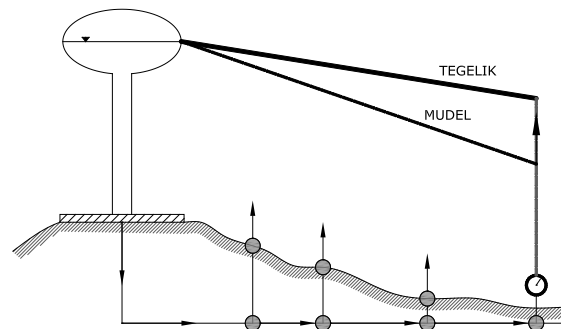
1. Modelleerija hindab mudeli parameetrid (toru karedus, tarbimine sõlmes)
2. Leitakse erinevused mõõdetud ja arvutatud parameetrite vahel
3. Kui vahed on liialt erinevad, otsitakse põhjust, tehakse muudatused ning protsessi korratakse iteratiivselt kuni leitud vastused on rahuldavad
4. Kui rahuldavat tulemust ei leita, tuleb teha lisamõõtmisi, et mudelit täpsustada (klappide tingimused, libatarbimised) – kontuurkaardid

Kontuurkaardid esitavad meile pildina, kus on probleemsed piirkonnad, nagu näiteks liialt väike vooluhulk või liialt suured erinevused rõhumõõtmistes. Manuaalset kalibreerimist saab läbi viia ühe kindla statsionaarse simulatsioonina, kuid mida rohkem erinevaid statsionaarseid režiime kasutatakse, seda täpsemalt esitab mudel reaalsel olukorda (erinevatel tarbimis-momentidel). Tulemuste edasiseks parandamiseks saab kasutada veel *EPS (extended period simulation)* kalibreerimist (ajas muutuvad andmed). Sõltuvalt voolutingimustest, mida simuleeritakse, omab mudel erinevaid reaktsioone erinevate andmetüübi muudatustele. Järgnevalt mõned üldised juhtnöörid. Keskmise vooluhulga ning minimaalne vooluhulk - enamik süsteeme on loodud töötama maksimaalsel tunnil + tulekustutusvesi. Sestap on keskmisel tunnil olevad rõhukaod üsna minimaalsed ning kalibreerimine sellel hetkel ei anna palju infot karedustegurite ega ka tarbimiste kohta. Samas keskmised tingimused on teeviidakas ääretingimustele ning sõlmede kõrgusmärkidele

Maksimaalne vooluhulk esitab süsteemi suur-tarbimise (tulekahju või tarbimise tipptund). See mõjutab toru karedusi ning tarbimisi üsna suurel määral. Seega tuleks neid vaadata just maksimaalsel tunnil. Mida suurem vooluhulk/karedus, seda suurem on rõhukadu.



*Mudel < Tegelik*  
 Mudelis liiga väikesed rõhukaod  
 (suurenda tarbimist ja/või muuda karedust)



*Tegelik < Mudel*  
 Mudelis liiga suured rõhukaod  
 (vähenda tarbimist ja/või muuda karedust)

Kalibreerimisega tegeleme alati piirkonna kaupa – mõõtmispiirkondades/survetsoonides. Kui mingi piirkond on võimalik isoleerida, siis seda on ka lihtsam kalibreerida, kuna see ei sõltu ülejäänud süsteemi käitumisest ja/või vigadest.

Kui aga kalibreerimise kooskõla leitakse vaid ühes sõlmes ja mitte kõikides? Esimene kontroll – veendu, et sõlme kõrgusmärk on õige. Maksimaalsel vooluhulgal saadud rõhukadu võib peita kõrgusmärkidest tingitud vead – seetõttu tuleks neid väärtuseid kontrollida minimaalsel vooluhulgal, kui rõhukaod süsteemis on väikesed.

Kareduskoefitsientide parandus – läbi hüdrantide läbilaskevõime testide saab modelleerija simuleerida need olukorrad mudelis ning saada rõhukadude hinnangud staatilises ning testi hetke tingimustes, seejärel saab arvutada parandustegurid kareduskoefitsientidele:

$$A = \frac{F}{(b/a)(Q_e + F) - Q_e}$$

$$B = \frac{F}{b(Q_e + F) - aQ_e}$$

H-W valemities

$$Q_c = AQ_e$$

$$C_c = BC_e'$$

kus: A, B – parandustegurid; F – hüdrandi vooluhulk;  $b = (h_2/h_4)^{0.54}$ ;  $h_2$  – mõõdetud rõhukadu, väljavoolul [m];  $h_4$  – modelleeritud rõhukadu, väljavoolul [m];  $a = (h_1/h_3)^{0.54}$ ;  $h_1$  – mõõdetud rõhukadu testlõigul, staatiline tingimus [m];  $h_3$  – modelleeritud rõhukadu testlõigul, staatiline tingimus [m];  $Q_e$  – hinnanguline tarbimine testitavas piirkonnas [ $m^3/s$ ].

Seejärel saame arvutada parandatud tarbimisvooluhulgad  $Q_c$  ning kareduskoefitsiendi  $C_c$ .

$C_c$  – algne C karedustegur.

Need valemid kehtivad siis mistahes ühikusüsteemi korral, kuniks vooluhulgad ning surved on omavahel vastavuses.

Näide: Kareduskoefitsientide parandus:

- Surve lähimas mahutis on: 300m
- Tarbimised hüdrandikatse läheduses on: 10 l/s
- Hüdrandi väljavool: 37.5 l/s
- C-faktor testpiirkonnas hinnatud kui: 85

Leida parandatud tarbimine ning uus C-faktor.

	Mõõdetud HGL (m)	Arvutatud HGL (m)
Staatiline	297	296
Hüdrandi katse	287	282

$$a = \left( \frac{300 - 297}{300 - 296} \right)^{0.54} = 0.856$$
$$b = \left( \frac{300 - 287}{300 - 282} \right)^{0.54} = 0.839$$
$$A = \frac{0.0375}{(0.839 / 0.856)(0.01 + 0.0375) - 0.01} = 1.026$$
$$B = \frac{0.0375}{0.839(0.01 + 0.0375) - 0.856(0.01)} = 1.198$$
$$Q_c = 1.026 \cdot (10) = 10.26$$
$$C_c = 1.198 \cdot (85) = 102$$

Need uued väärtused sisestatakse mudelisse. Leitud väärtused on kooskõlas sellega, mida võis ka eeldada.

### Automaatne kalibreerimine

Mudeli kalibreerimine on olnud ajalooliselt veapõhine kalibreerimine, kus toru kareduste või tarbimiste kalibreerimise käigus püütakse jõuda mudeli ja reaalse võrgu kokkulangevuseni. Nagu me varasemalt nägime, on sobivaid kalibreerimisparameetrite gruppe terve rida ning see on tõsine ülesanne insenerile, kes peab leidma parima lähendi. Seega saab modelleerija kalibreerimisprotseduuri hoopis hõlpsamini läbi viia kasutades selleks arvutimudeleid, numbrilised optimeerimise tehnikad, mis suudavad määrata kalibreeritavate parameetrite optimumid, et oleks kooskõla mõõdetud tulemustega.

Arvutimudelid kaasavad optimeerimise tehnikaid, leidmaks optimaalseid kalibreerimisparameetrite gruppe, mis kattuvad võimalikult hästi mõõdetud andmetega. Kirjandusest võib leida tohtul hulgal erinevaid kalibreerimise meetodikaid, mis on loodud alates 1970ndatest. Need võib jagada kolme põhikategooriasse: (a) iteratiivsetel protseduuridel põhinevad mudelid; (b) ilmutatud mudelid (hüdraulilise simulatsiooni mudelid); (c) ilmutamata mudelid (optimeerimise mudelid).

Iteratiivsetel protseduuridel põhinevate mudelite juures toimub teadmata parameetrite iteratiivne uuendamine läbi surve/vooluhulkade võrdlemise simulatsiooni-mudelid. Enamasti on vajalik skeletoniseerimine (mudeli lihtsustamine). Vaid väikest kalibreeritavate parameetrite hulka saab efektiivselt hallata ning konvergens (koondumine) iteratiivsetel mudelitel on suhteliselt aeglane. Need

modelid andsid pidepunktid veevõrgumodeli süsteemide kalibreerimiseks, et välja arendada teist tüüpi kalibreerimise meetodeid.

Ilmutatud mudelite (*explicit models*) korral lahendatakse mitut statsionaarset režiimi, massijäävuse ning energiabilansi võrrandit. Tegemist on võrgumudelitega, mis otsivad lahendit toru karedusele või tarbimisele aga ka rõhule ning vooluhulgale. Algvõrranditele lisatakse võrrandid, mis saadakse surve ja vooluhulga mõõtmistest (üks võrrand mõõtmise kohta) ning neid lahendatakse numbriliselt. Otsitavate parameetrite arv ei tohi olla suurem kui olemasolevate mõõtmisandmete arv (*even-determined*) – seega kui kalibreeritavaid parameetreid on rohkem kui kättesaadavaid mõõtmistulemusi (*underdetermined problem*), peab kalibreeritavaid parameetreid grupeerima. Siin ei arvestata mõõtmisvigu ning parameetrite hinnangutele on raske välja tuua ebamäärasusi.

Ilmutamata mudelid (*implicit models*) on optimeerimisel põhinevad mudelid. Kalibreerimise probleem defineeritakse optimeerimisena, mille käigus võetakse kasutusele mingi sihifunktsioon (*objective function*): (a) vea ruutude summa; (b) absoluutvigade summa; (c) maksimaalne absoluutviga. Viga leitakse kui [Mõõdetud] – [Arvutatud]. Vigade võrdlemisel kaasatakse tavaliselt surve ning vooluhulga vahelisi vigu, samas võib kasutada ka mahutite veetasapindade, rõhukadude või kloori jääkväärtustel põhinevaid vigu. Lisaks võib tuua ka näiteid, kus on kasutatud rõhu erinevusi ajahetkedel. Hüdraulilised mudelid, mis optimeerimise meetoditega lingitakse võivad olla: (a) statsionaarsed mudelid (üks või mitu tarbimise tingimust); (b) laiendatud perioodi simulatsiooni mudelid (*EPS*); ning (c) mittestatsionaarsed (löögi) mudelid.

Optimeerimise meetodid otsivad lahendeid, mis kirjeldavad tundmatuid parameetreid nii, et sihtfunktsiooni väärtus oleks minimaalne, samas rahuldades piiritingimusi, mis kirjeldavad sobivate parameetrite ruumi (*feasible parameter space*). Tavaliselt defineeritakse kui vahearuutude summa minimeerimine (mõõdetud) – (arvutatud). Defineeritakse kui vahearuutude summa minimeerimine:

$$\min_x f(x) = \sum_{i=1}^N w_i [y_i^* - y_i(x)]^2,$$

kus:  $f$  – sihifunktsioon;  $x$  – tundmatute vektor;  $N$  – mõõtmisandmete arv;  $w_i$  – kaal (vähendamaks mõnede mõõtmisandmete osakaalu, mis on vähem täpsemad ning tõsta nende osakaalu, mis on täpsemad);  $y^*$  - mõõdetud väärtus;  $y_i$  - arvutatud; ( $x$ ) – muutuja (vooluhulk, surve).

Igat optimeerimist kontrollitakse hüdraulilise arvutusega, seejärel viiakse läbi uus optimeerimine (leitakse sihifunktsioon, uuendatakse vajadusel parameetrite väärtusi) ja jätkatakse taas hüdraulilise simulatsiooniga.

Tundmatuteks parameetriteks võivad olla näiteks: karedus, tarbimine, teatud elemendi seisund (kinni/lahti).

Piiritingimusteks on pidevuse- ning energiajäävuse võrrandid, teadaolevad algsed väärtused (kinni/lahti, mahuti veetase) ning ääretitingimused (reservuaari veetasapinnad).

Peale esmast hüdraulilist arvutust, tuleb antakse optimisaatori kätte, kus leitakse sihifunktsioon, piiritingimused ning vajadusel uuendatakse otsustusparameetrite väärtusi. Uued väärtused antakse simulatsiooni moodulile, mis omakorda kordab protseduuri ja taas korratakse protsessi, kuniks soovitud kalibreerimistäpsus on saavutatud.

Lisaks on veel üsna levinud stohhastilised otsimisprotseduurid, näiteks *GA* (*genetic algorithm*) aga ka *SCEM-UA* (*Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm*), mis samamoodi töötavad optimisaatoriga ning hüdraulilise simulaatoriga.

*GA* (Savic, 1995) põhineb geeniteoorial, kus genereeritakse teatud hulk lahendeid ning neist parim jääb vaid ellu ning kantakse edasi nn ellujääjate (järglaste) gruppi. *GA* töö seisneb selles, et igale võimalikule

lahendile (mis sisaldab teatud gruppi kalibreeritavaid parameetreid) leitakse sobivusaste. Sobivusaste määratakse, kui hästi korreleeruvad kandidaatlahendid, mis saadakse simuleeritud vooluhulkade ning rõhkude leidmisel, väärtustega, mis saadakse mõõtmistest. Mitu statsionaarset simulatsiooni viiakse läbi, et simuleerida erinevaid tarbimistingimusi nagu miinimum-, keskmine-, maksimaalne tund. Iga mõõtmispunkti ja statsionaarse režiimi lahendi juures leitakse erinevused simuleeritud ning mõõdetud andmete vahel, ning leitakse sihifunktsioon (üldine viga tervele võrgule). Sihifunktsioone võib defineerida mitmeti, tavaliselt kasutatakse eelpooltoodud variante (vea ruut või *root mean square*). Samuti saab lisada erinevaid kaalusid survetele ning vooluhulkadele. GA jätkab uute võimalike lahendite genereerimist kuniks võrdlus olemasolevate lahenditega ei anna enam olulist parandust. GA nõuab head süsteemi tundmist ning samuti vajab teatud algoritmi parameetrite paika seadistamist. Lisaks jõutakse kiiremini õige lahendini, kui antakse talle ette teatavad vahemikud, kust parameetreid peaks otsima. Võimalik on teostada selline lisaprotseduur, kus kasutaja saab valida õigete muutujate grupid, mis lahendisse lähevad.

### Probleemid kalibreerimises

Kui vead mõõtmisandmetes on samas suurusjärgus kui tegelik survekadu, siis neid väärtusi ei tohiks kasutada kalibreerimises, sest algoritm püüab leida mõõtmistulemusele vastava modelleeritud tulemuse. Kui voolukiirused on väikesed, tuleb leida alternatiivseid mõõtmismeid. Suurendada vooluhulkasid ning võtta andmed neis olukordades. Andmeid on kahesuguseid: mõned, mis on fikseeritud teatud aja jooksul (karedus, klapi seisund) ning teised, mis on suhteliselt ebakindlad ning muutuvad (tarbimine). Seega kui toru karedus, mis leitakse olevat 90, võib olla nii ka mitte väga pikalt ette vaadates, siis tarbimine konkreetsetel rõhumõõtmisperioodil ei pruugi olla see sama ka tulevikus.

Kui meil on vähem mõõtmisandmeid kui kalibreeritavaid parameetreid, siis eksisteerib terve rida võimalike lahendusvektoreid, mis vastavad mõõtmistele (näiteks C väärtused). Seega tuleks selliste mudelite lahenditesse suhtuda ettevaatlikult. Probleemid võivad esineda ka siis, kui meil on täidetud nõue, et mõõtmisandmeid on samapalju või rohkem kui kalibreeritavaid parameetreid. Samas võivad olla osad lisamõõtmised tehtud vähetundlikes piirkondades, kus need ei avalda mõju kalibreeritavatele parameetritele või erinevad mõõtmised üksteisest liialt vähe ning samuti ei anna unikaalselt lisainformatsiooni. Probleemi määratavuse lahendamiseks saame vähendada tundmatute arvu, kui grupeerime teatud piirkonnas parameetrid (näiteks eeldame, et toru karedused on selles piirkonnas ühed ja samad – lähtub toru materjalist, diameetrist, vanusest ning asukohast). Mõistagi võib teha juurde ka lisamõõtmisi. Samas võib grupeerimine ka lisavigu põhjustada, kuna üks toru ei oma vastavat grupi parameetrit. Grupeerimine ning uue info kogumine pole alati võimalik, sestap tuleb kasutusele võtta teisi võimalikke variante. Näiteks *prior estimates* seab piirid/vahemiku enne kalibreerimist, kust otsitakse väärtusi. Neid võib leida erinevate uuringute käigus saadud tulemusi analüüsid (see andmestik peab olema sõltumatu sellest, mida kasutatakse otseselt kalibreerimises). Siia alla kuulub ka inseneri kogemus, kirjandusest saadavad sõltuvused (nt valem, mis kirjeldab toru karedust vanuse/materjali järgi), pumba test-kõverad. Sellise tehnika väljatöötamine annab olulise võidu parameetrite kalibreerimises ning nende hinnangutes.

*Prior estimates* ehk esialgsed väärtused saab esitada:

$$\min_x f(x) = \sum_{i=1}^N w_i [y_i^* - y_i(x)]^2,$$

$$\min_x f(x) = [y^* - y(x)]^T W [y^* - y(x)],$$

$$\min_x f(x) = [y^* - y(x)]^T W [y^* - y(x)] + [x_0^* - x_0]^T V [x_0^* - x_0],$$

kus:  $y^*$  - mõõdetud;  $y_i$  – arvutatud;  $T$  – transponeeritud operaator;  $W$  – kaalumatriks;  $x^*$  - esialgsed väärtused (pseudo mõõtmised);  $x_0$  – tegelikud parameetrid;  $V$  – kaalumatriks.

Lisandub vahe ruutude summa esialgsete väärtuste kohta.

Tuleb rõhutada, et enamikel juhtudel on mõõtmisandmed usaldatavamad kui esialgsete väärtuste hinnang.

Ei ole soovitatav kasutada tundlikke parameetrite väärtusi kui algseid väärtuseid, sest see viitab pigem mudeli probleemile (näiteks on mudelis klapp täielikult kinni, kui reaalselt on see poolenisti avatud). Ebamäärasuste vähendamiseks ning lahendite parandamiseks eelnevalt leitud ebamäärase parameetrite/vähetundlike parameetrite tarvis võib kasutada esialgseid väärtusi, lisamõõtmisi või mõlemat. Esialgsed väärtused tuleb hoolikalt valida, kaalud peavad esitama kindlustunnet iga eeldatud väärtuse kohta. Parim lahend on alustada väiksemate kaaludega ning seejärel neid tõsta. Lisaks on soovitatav parameetri kohese parandamise asemel optimeerimismudelil kasutada hoopis seda kui uut parameetrit/muutujat ühes lisatud algse väärtuse ning kaaluga. Tuleb meeles pidada, et ebamäärasused kalibreeritava parameetri juures üldjuhul vähenevad, kui on teada esialgsed hinnangud. Samas mitte alati ei pruugi see viia õige väärtuseni. Parandus sõltub hinnatud väärtuste kvaliteedist ning ka kvantiteedist. Veatu hinnang viib ka veatu tulemini.

Seega põhisammud esialgsete väärtuste sisse toomiseks:

- Lahenda optimeerimisprobleem vaid mõõdetud andmetega (esialgsete väärtusteta).
- Leia optimeeritud parameetrite tundlikkus ning ebamäärasus (millega need arvutati).
- Määra vähetundlikud ning ebamäärased parameetrid, need ongi kandidaadid esialgsetele väärtustele.
- Ebamäärase parameetrite tarvis võib kasutada esialgsete väärtuste kasutamist, lisamõõtmisi või mõlemat. Lisaks võib neid saadud tulemusi kasutada kui uusi teadaolevaid muutujaid süsteemi kohta ühes algsete hinnangute ning kaaludega.

Andmete tundlikkuse analüüs kalibreerimiseks on väga oluline eeletapp. Peamine küsimus: mida, millal ning mis tingimustel ja kus peaksime süsteemi käitumist uurima ning andmeid koguma, et see viiks parima lahendini. Siiani olema vastanud küsimustele: mida?, millal?, ning mis tingimustel? Aga kus? Ikka suurtaarbitsemise läheduses, skeletoniseeritud võrgu perimeetritel ning piisavalt eemal sisendpunktidest.

Aga kumbast alustada? Kalibreerimine vs andmete tundlikkuse analüüs? Sama hea, kui küsida: “Kumb oli enne, kas muna või kana?” Kalibreerimisele eelnevalt on vaja lahendada küsimus, kus mõõta? – samas “kus mõõta” leidmiseks on vaja lahendada kalibreerimisprobleem. Lahenduseks oleks, kus neid kahte asja vaadatakse koos – iteratiivselt.

Tundlikkuse analüüs põhineb GIS andmebaasist saadud teemakaartidel (Walski, 2002).

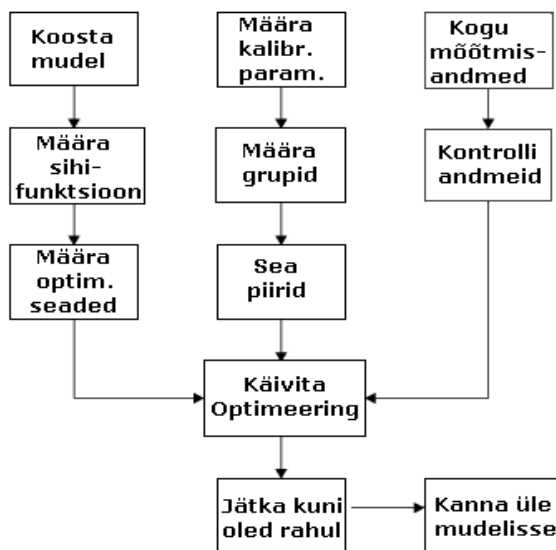
Mis aga oleksid sihifunktsioonid? Maksimeerida kalibreeritavate parameetrite täpsust või vähendada mudeli tulemite ebamäärasusi ning minimeerida kulutusi mõõtanemete võtmiseks. Mõned nüansid, miks optimeerimine pole aga parim lahendus mõõtpunktide asukoha määramiseks: (a) mitmed tegurid on olulised, mis peavad olema määratud väga täpselt selleks, et optimeerida; (b) statsionaarsed vs hooajalised mõõtpunktid; (c) hüdrauliline vs kvaliteedi monitooring; ning (d) mõõtpunkt peaks olema dünaamikale reageeriv.

Põhisammud optimeeritud kalibreerimises:

1. Kalibreerimata, samas mõistlikult töötav mudel!
2. Mõõtmisandmete kogumine ühes veapiiridega, ääritingimused.

3. Parameetrite grupeerimine, piiride seadmine laiemalt
4. Sihifunktsiooni määramine, kaalude lisamine, algoritmi siseste parameetrite seadistus
5. Kalibreerimise läbiviimine, esmaste tulemuste saamine (hinnang mudeli tulemustele, miks?)
6. Algpriiride täpsustus (vt. samm 3)
7. Tulemuste üleviimine mudelisse, parameetrite redigeerimine sõltuvalt keskmise, maksimaalse vm tunni kohta.

Mudelit tuleb pidevalt kontrollida. See tähendab, et testida mudelit erinevates tingimustes. Näiteks kui kalibreeriti maksimaalsele päevatarbimisele, siis proovida, kas keskmisele päevatarbimisele annab mudel tõetruusid väärtuseid. Lisaks tuleb mudeleid uuendada regulaarselt, kuid enamus operatooreid teeb risti-vastupidi, - nad teevad seda siis, kui neile seda meelde tuletada või kui neil selleks aega on. Aastataguste mudelite jaoks tuleb kindlasti teha lisamõõtmised (hüdrandikatsed), et proovida, kas mudel vastab hetke olukorrale.





## EPS mudeli kalibreerimine

Statsionaarses režiimis kalibreeritud mudel peab olema õige: maapindade suhtes, tarbimiste jaotuste lõikes ning toru kareduste lõikes. Seejärel võib alustada EPS mudeli kalibreerimist, mis koosneb peaaesjalikult ajutiste tarbimiste muudatuste sisseviimises. Juhul kui mudelit kasutatakse hüdrauliliste arvutuste läbivaatuseks, siis keskendutakse rohkem mahuti veetasemetele ning vooluhulkadele süsteemis. Kui mudelit kasutatakse aga energeetika seisukohast, peaks fookuses olema mudeli võime ennustada pumba tööd (graafik) ning energia tarbimist.

Redigeeritavateks parameetriteks on mahuti veetasemete võrdlus: (a) kui mõlemad on samasuunalised, siis peab korrigeerima tarbimisi; (b) kui aga liiguvad vastassuunas, siis tuleb kontrollida pumpade tööd või klappe (suletud/avatud). Tarbimiste suurusjärku, mida reguleerida, saab leida mahuti mahumuutustest (võrreldes modelleeritud ning mõõdetud tulemit). Erinevused modelleeritud ja mõõdetud tulemustes ei tähenda alati, et mudel on ebatäpne, kuna andmestik sisaldab alati ebamäärasusi; sensorite vale paigutus kõrguslikult; pumba sisse/välja lülituste vale ülesvõtmine; või erinevused mõõtmistes (keskendatud ning konkreetse hetke andmed), ekslikult vale ajavõtu kasutamine – viide SCADA süsteemis.

Kalibreerimises võib kaasata ka juhtmineraale. Enamjaolt kasutatakse veekvaliteedi mudelite kalibreerimises. Esmalt tuleks läbi viia lihtne juhtmineraali liikumise analüüs mudelis, et leida kohad, kust oleks parim võtta proove. Eesmärk on leida, kas mudel suudab ennustada juhtmineraalide kontsentratsioone, mis on reaalses süsteemis mõõdetud. Selle abil saab infot, kuidas vesi süsteemis liigub, leida suletud klappe ning määrata torud, mis on mudelis vale diameetriga. Ei sobi toru kareduste ning pumba kõveratest tingitud vigade otsimiseks, kuna need parameetrid ei avalda suurt mõju vooludiagrammidele. Juhtmineraal peab olema odav, turvaline ning lihtsalt kindlaks määratav.

Energeetika seisukohast tuleb lahti mõtestada, mis energiat tarbib (nt pumbajaamas pole selleks mitte ainult pump aga ka valgustus, SCADA, küte-vent, jne). Üldiselt mõõdetakse seda kõike koos, seega tuleb eraldada teatud komponendid, et saada efektiivne pumba energia tarbimine. Oluline on aru saada, millist võimsust mõõdetakse: näiline ( $kVA$ ) või tegelik ( $kW$ )? Kui mõõdetakse näilist võimsust, tuleb see konverteerida tegelikuks võimsuseks, et saaks võrrelda mudelites oleva pumba energeetikaga. Üldiselt on soovitatav võrrelda  $kWh$  mudeli ja mõõdetud andmetes, kuna mitme-tariifsed arvestussüsteemid muudavad arvutuse üsna keerukaks.

## Veekvaliteedi mudelite kalibreerimine

Eesmärgiks on leida võrgu dünaamiline käitumine. Veekvaliteedi mudelite kalibreerimine on oluliselt keerulisem, kui hüdrauliline kalibreerimine, seega on ka simuleeritud ja mõõdetud tulemite täpsusklass oluliselt madalam. Kaasatakse lähtekontsentratsioonid nn sisend-kontsentratsioonidena piiritingimustes (hüdr.kalib. reservuaar, mahuti), kuidas/kust aine süsteemi satub. Kaasatakse ennekõike veepuhastusjaamades, kuid riskiprobleemi lahendamiseks võib olla sisendiks mistahes võrgu element (sõlm, toru). Saab modelleerida kui konstanti või ajas muutuvana.

Algtingimused on matemaatiline viis kaasata ajaloolist infot sündmuste kohta, mis mingil hetkel süsteemi kirjeldab simulatsiooni käivitamise hetkeks (nt desinfektor, mis sisestati süsteemi 72 tunni eest, aga jõudis teatud tarbimispunkti just nüüd). Igale torule, mahutile, reservuaarile, sõlmele saab sisestada algtingimuse. Koostisosa analüüsiks on algne kontsentratsioon. Kontsentratsiooni ning veevanuse analüüsiks on selleks vastavalt veeprotsent, mis jõuab lähtepunktist ning algne veevanus selles punktis. Torudele saadakse algtingimuse tavaliselt interpolatsiooni teel (sõlmede, mahutite ning reservuaaride baasil).

Ka hüdraulilise simulatsiooni käigus tuleb määrata algsed tingimused, kuid seda tehakse selleks, et saaks paika piiritingimused.

Algtingimuste ennustamine veekvaliteedi mudelit juures on keerukam kuna: (a) koostisosa mõõtmine igas sõlmes, torus, reservuaaris, mahutis on ebapraktiline; (b) üheaegne mõõtmine on võimatu (enne modellerimist); (c) veevanuse algtingimuse hindamine on keeruline, kuna see on parameeter, mida on raske mõõta. Veekvaliteedi dünaamiline mudel samas aitab meil elimineerida algtingimustest tingitud ebatäpsused, seda eeldusel, et lastakse mudelil töötada piisava aja vältel. Sellisel juhul kaotavad algtingimused tähtsuse, sest need reageerivad süsteemis ning nende kontsentratsioonid asenduvad lähtekontsentratsioonidest tulenevatega.

Algtingimuste sisestamine. Veekvaliteedi mudelite hajuv iseloom on modelleerijale eeliseks. Tavaliselt sõltub simulatsiooni pikkus topoloogiast ning hüdraulikast, 3 kuni 10 korda päevast tarbimisgraafikut peaks olema piisav. Hüdraulilises mõttes peame olema veendunud, et mudel käitub adekvaatselt veekvaliteedi uurimiseks mõeldud aja vältel, sissevoolud võrduvad väljavooludega – vastasel juhul võivad mahutid tühjaks jääda või täituda ning häired tekivad simulatsioonis tervikuna (vastupidiselt perioodilisele käitumisele). Kui mudelit vaadatakse pika aja vältel võib algtingimused (torudes ning sõlmedes) seda mistahes väärtusele (ka 0.00 mg/l), kuna algtingimused hajuvad neis kiiresti. Samas mahutites, reservuaarides saavutavad algtingimused tasakaalu väga aeglaselt – teades nende balansseeritud väärtusi, saab oluliselt vähendada simulatsiooni aegasid.

Pane tähele, et kui sisendi käitumine või hüdraulika muutub, muutuvad ka balansseeritud väärtused mahutites.

Toru seina reageerimise koefitsiente on raskem mõõta, kui reageerimist vedelikumassis (*bulk reaction coefficient*). See on analoog toru karedusteguritele, ja seega iga toru puhul erinev. Otseselt mõõta pole võimalik, tuleb tuletada mõõtmisandmetest, mis sõltuvad ka aine jääkidest. Materjalid, mis on vähereageerivad, või suuremõõduliste torude puhul, tuleb isoleerida väga pikad sektsioonid, mis on aga raskendatud – seega tuleb kasutada teisi meetodeid.

Kalibreerimine/kontroll dünaamilise andmestiku korral toimub üldjuhul erinevat andmestikku kaasates. Erinevat tüüpi andmestikku saab kasutada erinevates etappides nagu hüdraulilised mõõtmised, veekvaliteedi andmestik, juhtmineraalide andmestik.

## Kalibreerimise normid

Mistahes kalibreerimismeetodit kasutades, peab reaalselt olukorda esitav mudel kokku langema mingi üldist hinnangut esitava kriteeriumiga. UK-s on kasutusel kindlad normid, USA-s neid aga pole. Üldine reegel on, et kriteeriumid sõltuvad sellest, milleks mudelit kasutatakse ning operaatori rahulolu mudeli kvaliteedis olukordi ette näha saab siin määravaks. Mudeli kalibreerimist tuleb jätkata seni, kuni edasise parandamise maksumus ei ületa kalibreerimisest saadavat tulu.

Kalibreerimise kriteeriumid (vooluhulk):

- Torud, mille Q on suurem kui 10% kogutarbimisest:  $\pm 5\%$
- Torud, mille Q on väiksem kui 10% kogutarbimisest:  $\pm 10\%$

Kalibreerimise kriteeriumid (rõhk)

- 85% kogu mõõtmisandmestikust peavad olema kas  $\pm 0.5\text{m}$  või  $\pm 5\%$  maksimaalsest rõhukaost terves süsteemis, emba kumba on suurem.
- 95% kogu mõõtmisandmestikust peavad olema kas  $\pm 0.75\text{m}$  või  $\pm 7.5\%$  maksimaalsest rõhukaost terves süsteemis, emba kumba on suurem.
- 100% kogu mõõtmisandmestikust peavad olema kas  $\pm 2\text{m}$  või  $\pm 15\%$  maksimaalsest rõhukaost terves süsteemis, emba kumba on suurem.

Oluline on meeles pidada, et kui mõõtmisandmed on teatava vea piires, siis ka mudeli viga (ebatäpsus) ei saa olla sellest veast väiksem. Näiteks kui surve on teada 2 meetrise täpsusega, siis mudelilt ei saa me loota suuremat täpsust kui 2 meetrit. Mudelit võib pidada kalibreerituks, kui mudeli tulemusi saab kindlustundega kasutada otsuste tegemiseks, mis puudutavad veevõrgu süsteemi disaini, opereerimist ning haldust ning edasise mudeli parandamise maksumus pole enam põhjendatud.

## Referentsid

### *Artiklid*

Savic, D. A., and Walters, G. A. (1995). "Genetic Algorithm Techniques for Calibrating Network Models." Report No. 95/12, Centre For Systems And Control Engineering, School of Engineering, University of Exeter, Exeter, United Kingdom, 41.

Walski, T. M. (1990). "Sherlock Holmes Meets Hardy Cross or Model Calibration in Austin, Texas." Journal of the American Water Works Association, 82(3), 34.

Walski, T. M. (2002). "Identifying Monitoring Locations in a Water Distribution System Using Simulation and GIS." Proceedings of the AWWA Information Management and Technology Conference, American Water Works Association, Kansas City, Missouri.