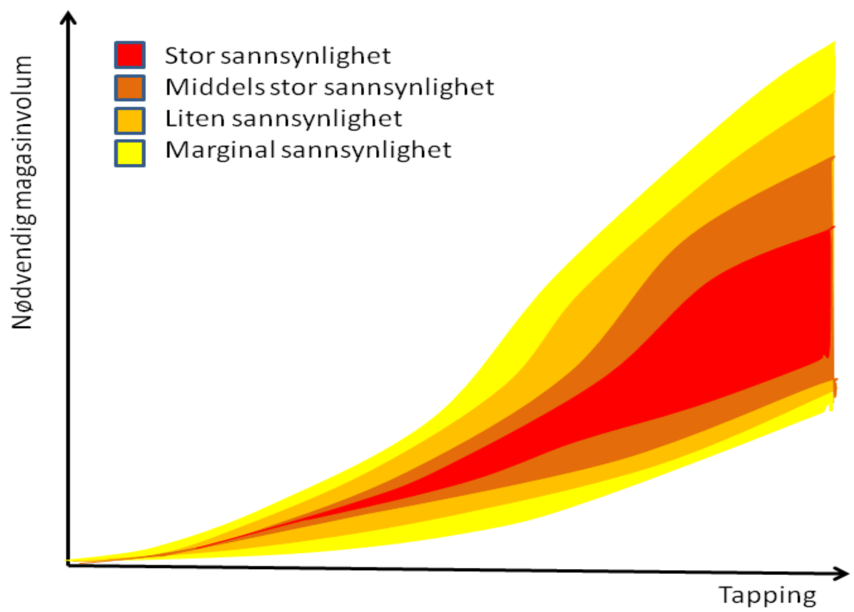
Reguleringskurvelogikk

Mine betraktinger og resulterende logikk, -Trond Reitan

1 Introduksjon

En reguleringskurve er en graf som viser ”regulert vannføring i % av gjennomsnittelig vannføring som en funksjonssammenheng og nødvendig magasin i % av gjennomsnittelig årlig avløp” (3) (originalt fra Otnes (1964), Meddelelse nr. 11 fra Hydrologisk avdeling). At enhetene for vannføringen og volumet skal være prosent av gjennomsnittelig vannføring og volum henholdsvis er ikke så viktig. Man kunne likeså gjerne vise det med andre enheter, slik som kubikkmeter per sekund for vannføring og millioner kubikkmeter for volum. Det viktigste er at det viser sammenheng mellom ønsket minimumsvannføring og det nødvendige magasinvolumet. Denne ønskede minimumsvannføringen vil for øvrig bli kalt ’tapping’ fra nå av.

Skjønt det at det skal være en sammenheng er slettes ikke opplagt. Over en gitt tidsperiode, vil ulike tappe- og magasineringsstrategier nødvendiggjøre ulike magasinstørrelser for å sikre en gitt tapping. Så denne sammenhengen vil være e funksjon av en slik strategi. Forløpet til vannføringen i en tidsperiode er det som avgjør hva som blir nødvendig volum for en gitt tapping, noe som også betyr at ulike tidsperioder vil gi ulike resultater. Det som er et tilstrekkelig volum til å få ut en gitt tapping i en tidsperiode vil ikke være det samme i en annen tidsperiode. Man har altså en fordeling av nødvendige volum for en gitt tapping over en gitt type tidsperiode (normalt et år fra en gitt dato til den samme neste år). Denne ideen er skjematisert i fig 1.



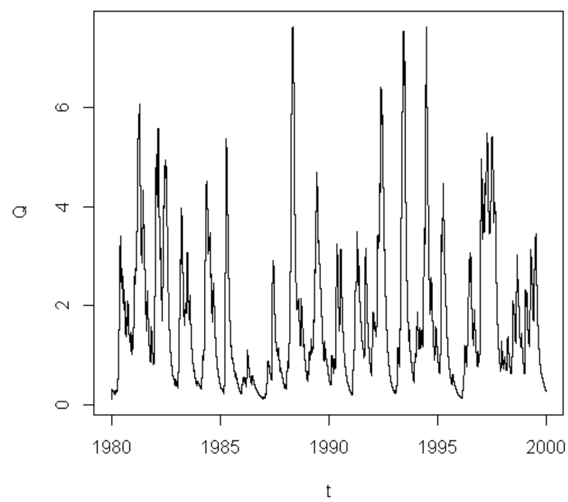
Figur 1: Skjematisk fremstilling av en fordeling av årlig nødvendig magasinvolum gitt tapping.

Fra dette kan man få ulike statistikker for hver tapping, slik som persentiler og gjennomsnitt. Det som brukes i praksis ser ut til å være maksimum (verste-tilfelle), 90%-persentil (bestemmende) og median. Statistisk sett trenger man ikke få noe verste- eller beste-tilfelle, med mindre det finnes noen kjent øvre grense for vannføringsforløp. Statistisk sett kan dermed ikke maksima ha noe fast verdi. Hvis man begrenset seg til en større tidsperiode, si 30 år, vil det maksima man får ut fra en tidsserie være begrenset, men den kan forventes selv å ha en fordeling med stor varians. Jeg ser derfor på bruken av dette målet som statistisk svært suspekt.

Grunnen til reguleringskurvens eksistens er først og fremst Vassdragsreguleringslovens ledd § 3,2 der det heter (3): "økningen av vandføring beregnes paa grundlag av den økning av vassdragets lavvandsvøring, som reguleringen antages at ville medføre utover den vandføring, som har kunnet paaregnes aar som andet i 350 dage av aaret. Ved beregningen av denne økning forutsættes det, at magasinet utnyttes paa saadan maate, at vandføringen i lavvandsperioden blir saa jevn som mulig".

Det jeg får ut av lovteksten er at den på ingen måte spesifiserer hvordan reguleringskurven beregnes, ut over det at aktuell tidsperiode er ett år. At teksten sier 350 dager antas her foreldet og ser ikke ut til å være tatt hensyn til i eldre kode heller.

Det jeg ville antatt var rimelig i denne sammenheng var at man skaffet tilveie en fornuftig statistisk modell for vannføring basert på tidligere historikk. Dette vil gi en pekepinn på hva man kan forvente av vannførings-forløp hvert år, inkludert variasjonen i dette. En enkel hydrologisk modell inneholdende en tidsseriemodell for nedbør (regneflom) og temperatur (smelteflom) burde være tilstrekkelig til et slikt formål. En realisasjon fra en slik modell (svært enkel, ikke inkludert snøsmelting) er vist i figur 2. Man kan deretter lete etter den tappe-strategien som gir minimalt nødvendig magasinvolum gitt vannføringsmodellen. Dette vil være i tråd med lovteksten. (Merk at denne inneholder frasen "antages at ville medføre utover den vandføring", noe jeg vil tro er i tråd med en slik tankegang.) Da oppnår man å finne det magasinvolum som med en gitt sikkerhet trenges for å sørge for en gitt jevn vanntilgang i løpet av et fremtidig år. Ifølge Lars Roald, NVE, er en statistisk modell til grunn for reguleringskurve-metoden utviklet i Wallingford, Storbritannia. Jeg vil dermed tro rådende bruk av reguleringskurver i Storbritannia er basert på slik metodikk. Det er dessverre ikke denne er måten en reguleringskurve beregnes på i Norge.



Figur 2: Eksempel på utfall fra statistisk tidsseriemodell for vannføring.

Det man i stedet bruker er en såkalt summasjonskurve, som er en direkte transformasjon av den historiske vannføringsserien. De enkleste variantene av dette kalles Rippls metode, som ble utviklet for mer enn 100 år siden for små tapningsgrader og er beskrevet i (1) og (2). Tappestrategien avhenger av hele historikken. Dette gir det absolutt minste magasinvolum man ville trengt **hvis man kjente den fremtide vannføringen** for det tidsrommet der historikken ligger. De nødvendige volumene for den gitte tidsserien blir derfor mindre enn tappestrategier som ikke bruker senere vannføringsforløp. En ekstra fare med slik metodikk er at selv om metodikken ble utviklet for små tapningsgrader, blir den benyttet på store tapningsgrader, samt at fokuset er nettopp på slike. Mer om dette i de neste kapitlene.

Personlig har jeg vanskeligheter med å se at gjeldende metodikk adresserer lovtekstens eller hydrologiske behov korrekt. Siden gjelden bruk av reguleringskurver i juridisk sammenheng likevel er blitt bygd opp rundt slik metodikk, medfører det en betydelig treghet eller kanskje til og med full stopp i utvikling av metodikken. Likevel, jeg ser fra referanselisten at en viss utvikling og komplisering i detaljene i metodikken har funnet sted. Dette kunne brukes til å gå for full nytenkning basert på statistisk forståelse, men jeg frykter systemet har for stor treghet til det.

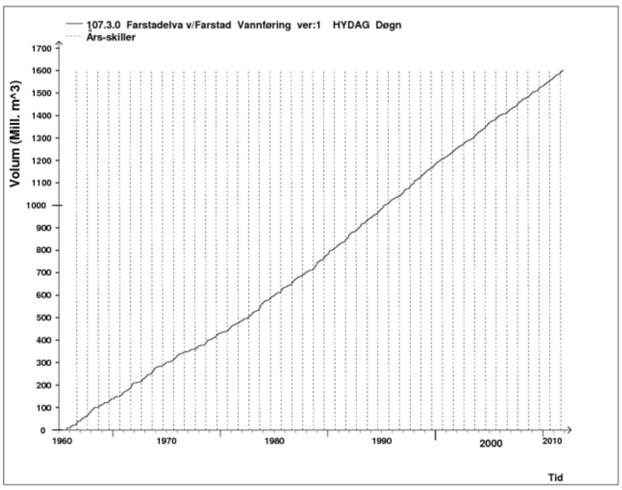
2 Summasjonskurver

2.1 Tidligere dokumentasjon

For å lage en reguleringskurve via Rippls metode trenger man å ekstrahere årlige maksimale magasineringer fra en summasjonskurve. Den enkle måten å gjøre dette blir beskrevet i (1) og (2), mens (3) er en mer komplisert metode som tar hensyn til flere spesialtilfeller. Det er metodikken beskrevet i sistnevnte referanse som blir brukt i Fortran-programmet REGKURV i START-systemet, som er dagens system for kalkulering av reguleringskurver på NVE. Metodikken i (3) var vanskelig å komme til bunn i. Mye av den ekstra metodikken virket vanskelig motivert og beskrivelsen gav inntrykk av operasjoner som ikke burde fungere. Jeg gjorde også et forsøk på å lese koden, men selv om det var en del kommentarer der var det også mye spaghetti-kode og dette gjorde koden enda vanskeligere å forstå. Lars Roald kunne heller ikke hjelp, da han overtok koden fra tidligere ansatte på NVE.

2.2 Generelt om summasjonskurver

En summasjonskurve representerer volumet av vannet som har rent forbi et sted fra et gitt tidspunkt. Man kan også si det representerer den mengden vann man får hvis man starter å magasinere alt vann fra et gitt tidspunkt. En typisk summasjonskurve er vist i fig. 3. Resultatet



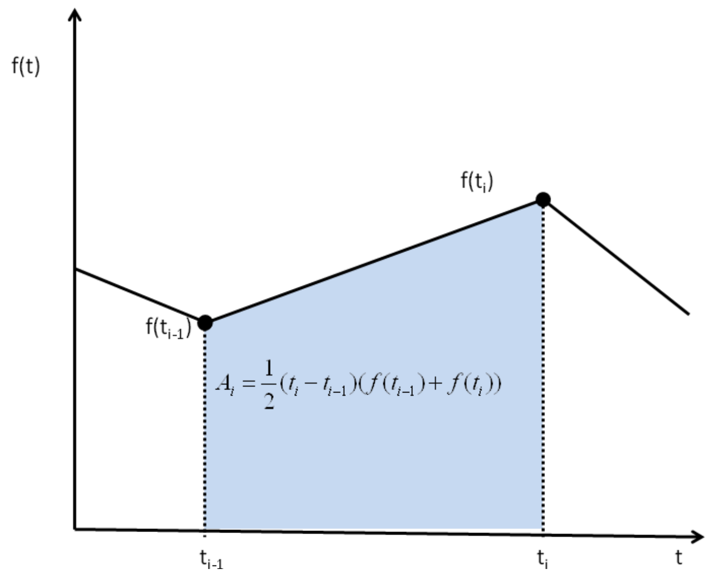
Figur 3: Summasjonskurve for Farstadelva.

ser ofte slik ut, nærmest som en rett linje på stor tidsskala.

Teknisk sett har summasjonskurver blitt beregnet ved å summere opp døgnlige volum=vannføring i $m^3/s*86400s$ fremover i tid. Altså får man en samling volum, ett per døgn, der verdien for ett døgn er verdien for forrige døgn pluss vannføringsvolumet det døgnet.

Men som sagt representerer en summasjonskurve egentlig oppsamlet vann, som kan beskrives som $S(t) = \int_{t_0}^{t} Q(t')dt'$, der *S(t)* er oppsamlet vann fra tid t_0 til *t* og *Q(t)* er vannføringen som funksjon av tiden, se (1). Siden det den deriverte til et integral er originalfunksjonen, vil den deriverte til summasjonskurven være vannføringen. Fremstiller man det grafisk, vil altså stigningstallet til summasjonskurven representere vannføringen. Merk at stigningstallet aldri kan være mindre enn null, siden dette ville representere negativ vannføring. Funksjonen S(t) er dermed monotont økende (strengt monotont økende hvis man kan anta vannføring>0).

Det at en summasjonskurve er resultatet av et integral gjør at man lett kan gå fra å beregne en summasjonskurve for data på en fast tidsoppløsning (døgn) til en definert for data målt på vilkårlige tidspunkt, $\{t_1, t_2, \ldots, t_n\}$. Man bruker triangulærmetoden for numeriske integral og få estimatet $S(t_i) = S(t_{i-1}) + (t_i - t_{i-1})(Q(t_{i-1}) + Q(t_i))/2$. Metoden kan også benyttes til å definere opp summasjonskurven på umålte tidspunkt, hvis det er et poeng. Metoden er skjematisert i fig 4. Det finnes kraftigere metoder for numerisk integrasjon, men disser er enten basert på antagelse om fast tidsoppløsning eller er ganske kompliserte.



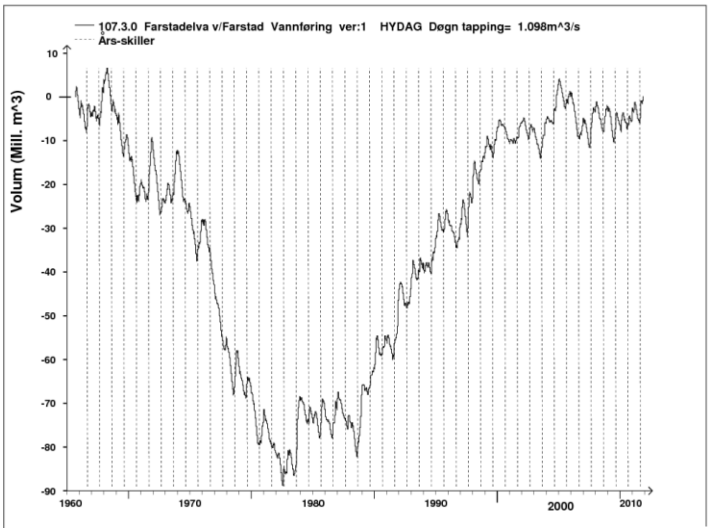
Figur 4: Numerisk integrasjon med triangulærmetoden.

Vi har dermed en definisjon på summasjonskurve som håndterer vilkårlige tidsskritt. Det neste er å bruke dem til å definere opp en optimal tappestrategi. Dette kunne gjøres på summasjonskurven slik den er definert opp nå, men det finnes varianter som kan være mer illustrativ.

Man kan hele tiden trekke fra en fast vannføring, som for eksempel den gjennomsnittelige vannføringen over tidsperioden man har data for. Med vilkårlige tidsskritt bør dette gjennomsnittet defineres opp som total vannmengde delt på total tid, $\overline{Q} = S(t_{slutt})/(t_{slutt} - t_0)$, for å være i overensstemmelse med summasjonskurven. Man får da en summasjonskurve som starter og ender med samme verdi (0), så den vil ikke ha den nesten konstante stigningen som gjør at man nærmest får en diagonal på plottet. I stedet vil grafen gå opp og ned.

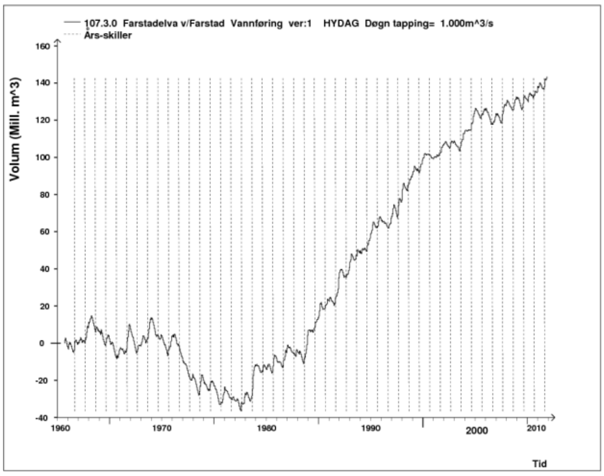
$$S_m(t) = \int_{t_0}^{t} [Q(t') - \overline{Q}]dt' = S(t) - (t - t_0)\overline{Q}.$$

Jeg vil kalle dette for summasjonskurven **justert** med middelvannføringen. Man kan se på denne kurven som bare en visuell forskyvning av den originale summasjonskurven, for bedre å vise avvik fra diagonalen. Men man kan også tolke denne funksjonen som å representere magasinvolumet i et magasin med uendelig kapasitet når man får inn vannføringen *Q(t)* og fast tapper vannføringen $\overline{Q}$, **relativt** til startvolumet. Man kan dermed godt få negative tall, som representerer at magasinet har mindre vann enn i starten. Fig. 5 viser en slik summasjonskurve for samme datasett som fig 3. Merk at i dette tilfellet ser det ut til at det har vært lengre tidsperioder med mindre enn gjennomsnittelig vannføring i starten og dermed også lengre tidsperioder med mer. (Dette kan være reelt, men kan også skyldes skiftende vannføringskurver.) Skulle man dermed ønske å tappe lik middelvannføringen over hele tidsperioden, måtte man startet med rundt 90 millioner m^3 vann i magasinet, siden man er såpass i manko rundt 1982.



Figur 5: Summasjonskurve justert med middelvannføringen.

Generelt sett kan man justere en summasjonskurve i forhold til enhver gitt vannføring (tapping), se fig. 6. Dette plottet viser summasjonskurve for samme data igjen som fig 3 og 5, men nå med et fratrekk på nøyaktig $1m^3/s$ (som er litt under middelvannføringen for perioden). Denne kurven gir altså netto volum (positivt eller negativt i forhold til originalvolumet) når magasinet tar inn den historiske vannførings-tidsserien og alltid slipper ut den gitte tappingen. Angir dette som $S(t \mid Q_{juster}) = S(t) - (t - t_0)Q_{juster}$. Dermed blir summasjonskurve justert med middelvannføringen $S_m(t) = S(t \mid \overline{Q})$.



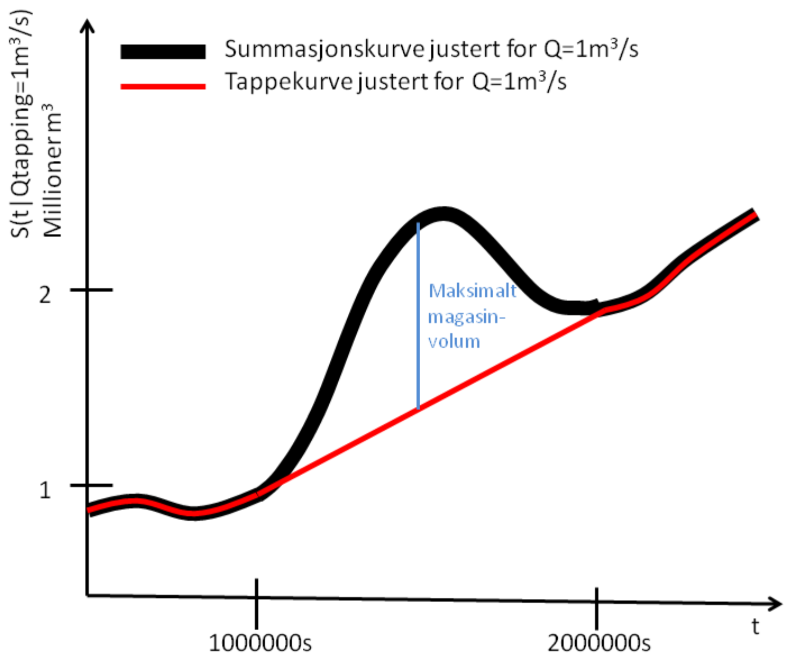
Figur 6: Summasjonskurve justert med tapping=$1m^3/s$.

Den deriverte til en justert summasjonskurve, *S(t)*, vil være $S'(t)=Q(t)-Q_{juster}$, som betyr at vannføringen blir $Q(t)=S'(t)+Q_{juster}$ (stigningstall pluss justert vannføring). Man kan altså fremdeles lese ut vannføringen fra en justert summasjonskurve, men må ta hensyn til justeringen. Er vannføringen mindre en Q_{juster}, vil stigningstallet være negativt og hvis vannføringen er større enn Q_{juster} vil stigningstallet være positivt. Merk at siden en ujustert summasjonskurve ikke kan ha stigningstall (derivert) mindre enn $0m^3/s$, kan en justert summasjonskurve ikke ha stigningstall mindre enn $-Q_{juster}$. Stigningstall null betyr for en justert summasjonskurve at vannføringen er lik Q_{juster}.

2.3 Summasjonskurver og tappestrategier

I tillegg til summasjonskurven, som representerer oppsamlingen av vann som kommer inn, kan man også angi en ønsket vannføring ut på samme vis, altså en tappestrategi. Dette vil gi en ny summasjonskurve, *T(t)*. Forskjellen mellom summasjonskurven for vannføring inn og for vannføring ut er magasinvolumet til enhver tid, $V(t) = S(t) - T(t)$. Man må derfor unngå det ufysiske tilfellet der summasjonskurven for vannføring ut er større enn summasjonskurven for vannføring inn. Om man bruker justerte summasjonskurver i stedet betyr ingenting, siden justeringene kansellererer hverandre.

Hvis man slipper vannet igjennom utenom en tidsperiode der man i stedet tapper fast og magasinerer resten vil representeres med en stigende kurve, se fig 6, der jeg igjen justerer i forhold til en vannføring på $Q_{juster}=1m^3/s$. Både før t=1.000.000s og etter t=2.000.000s er vannføring inn og vannføring ut det samme, men mens vannføring inn først øker og så minsker i tidsintervallet (1.000.000s, 2.000.000s), er vannføringen ut (tappingen) konstant. Siden de to kurvene er lik før t=1.000.000s, er magasinet tomt før det tidspunktet. Og siden de to kurvene møtes igjen ved t=2.000.000s, betyr det at på slutten av tappingen er magasinet tomt igjen. Maksimal forskjell mellom summasjonskurve for vannføring inn og vannføring ut (se blå linje og skrift) gir det maksimale vannvolumet i magasinet, med andre ord den nødvendige magasinkapasiteten. Merk at maksimal volum ikke skjer der summasjonskurven for vannføring inn topper seg, siden også summasjonskurven for vannføring ut stiger. Stigningstallet for tappingen er i dette tilfelle på $1m^3/s$, men merk også at jeg allerede har justert ned summasjonskurven med $1m^3/s$. Vannføring ut (tappingen) i intervallet (1.000.000s,2.000.000s) er dermed på $2m^3/s$.



Figur 7: Eksempel på summasjonskurve for vannføring inn og vannføring ut.

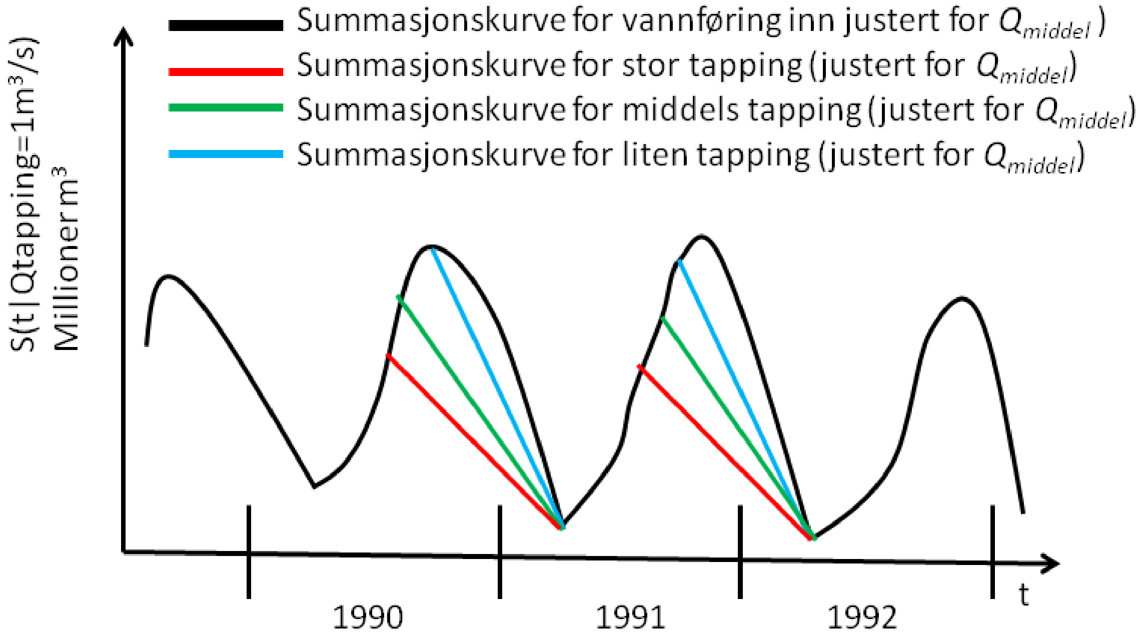
Ved å identifisere hvor man har stor og hvor man har liten vannføring i summasjonskurven, kan man dermed relativt lett spesifisere en fast tapping i et intervall som ville ha fungert og som ville medføre at man var nede i null volum utenfor intervallet (hvis tappingen ble startet med en kjennskap til fremtidig vannføringsforløp). Man bare konstruerer en linje med den tappevannføringen (stigningstallet) man ønsker som starter en plass vannføringen er større enn tappingen og som ender der linjen skjærer med summasjonskurven igjen.

2.4 Bruk av summasjonskurver til å beregne årsmaksima til magasinvolumet i eldre hydrologisk litteratur

I (1) og (2) er en forholdsvis enkel bruk av summasjonskurver angitt for å ekstrahere årlige maksimale volum. Først justerer man summasjonskurven i forhold til middelvannføringen, $Q_{juster} = \overline{Q}$. Man identifiserer så for hvert år hvor summasjonskurven har sitt minima. Året kan være definert som å ha en annen start enn 1/1. Ofte blir hydrologiske år brukt, som starter 1/9. Årsgrensen er valgt slik at man kan forvente en tømning av eventuelle magasin rundt årsgrensen. Merk at minima på en summasjonskurve justert for middelvannføringen vil representere tidspunkt der vannføringen har gått fra å være mindre enn middelvannføringen til å være større enn middelvannføringen. La oss kalle tidspunktet for et årlige minima for $t_{min,y}$, der y er året, og summasjonskurve-verdien for $S_{min,y}$.

For hver minimal vannføring (tapping), $Q_{tapping}$, man ønsker å se på gjør man så følgende: Hvis ser på summasjonskurven grafisk, blir neste steg å trekke en linje fra minima ett år og bakover i tid med stigningstall $Q_{tapping} - \overline{Q}$. Siden man normalt ikke vils e på tappinger som overgår middelvannføringen, vil dette stigningstallet være negativt, med andre ord trekker man det oppover mot venstre i grafen, se fig 8.

Tappestrategien kan dermed beskrives slik: Hvis man starter ved et minimum i summasjonskurven (juster med middelvannføringen), lar man altså for en tid vannføringen løpe fritt. Dette skjer inntil et tidspunkt som er slik at når man begrenser tappingen til den ønskede verdien, vil magasinet først fylle seg før det igjen tømmer seg igjen (volum=0) ved neste års minima. Tidsintervallet dette skjer i kaller jeg tappeperioden. Man identifiserer så hvor i tappeperioden i hvert år der forskjellen mellom summasjonskurven til vannføring inn og vannføring ut er størst. Denne forskjellen utgjør det årets maksimale fylningsvolum. Dette gir altså settet av årsmaksima for magasinvolumet.

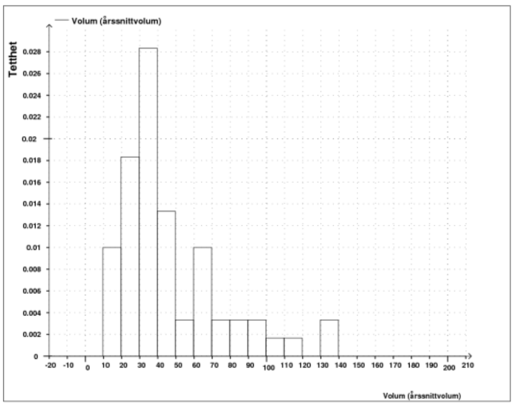


Figur 8: Faste tappinger som følger oppsettet i (1) og (2), for liten, middels og stor tapping for to år. Der man ikke har farget graf er tappingen ut lik vannføringen inn (null magasinvolum).

En fordel med den spesifiserte strategien er at man trenger kun å beregne summasjonskurven og identifisere minima en gang og så finne settet av årsmaksima for ulike tappinger. Ulempene med en slik spesifikasjon vil jeg komme inn på i kapittel 4. Referanse (3) ser ut til å følge en annen fremgangsmåte som beregner en summasjonskurve justert for hver tapping, og benytter seg av minima i disse summasjonskurvene i stedet. Til tross for de tilsynelatende unødvendige nyberegningene av nye summasjonskurver, skal vise seg at dette er en fornuftig strategi. Referanse (3) har også masse med komplisert og spesial-logikk for ulike situasjoner som var svært vanskelig å forstå (både motivasjons- og implementasjons-messig). Jeg tror denne logikken skal være der for å adressere de problemene jeg finner med logikken beskrevet i dette subkapittelet, men jeg vil gå for en enklere løsning.

3 Reguleringskurver

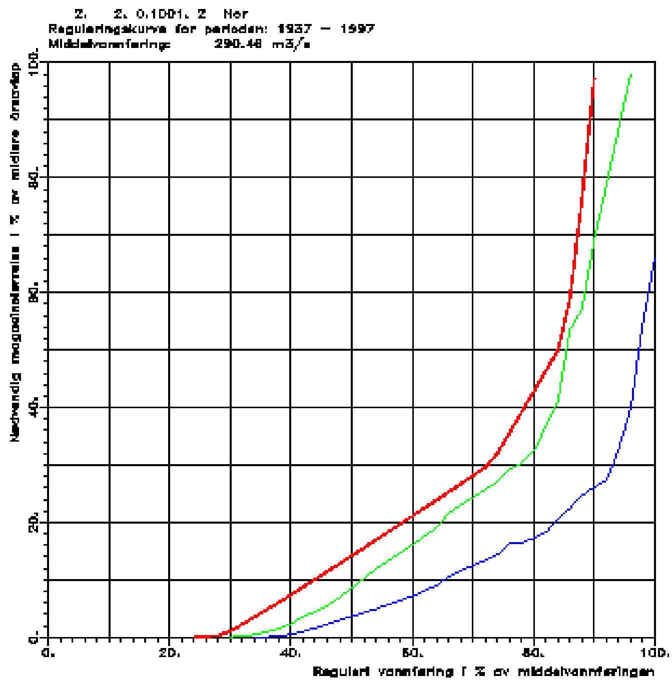
Når man via summasjonskurven har fått et sett årsmaksima for magasinvolum for en sett tappinger, kan man anse dette som realisasjoner fra **fordelingen** av årsmaksima for hver av tappingene man ser på. Her kunne man for en gitt tapping (og dermed et gitt sett årsmaksima) lagd histogram, se fig. 9, eller tilpasset til en parametrisk fordeling. Men ønsket visning ser ut til bare å være tre statistikker fra fordelingen, maksimalverdi, 90%-persentil og median.



Figur 9: Histogram for stasjon Nor (2.2.0) for tapping ca 95% av middelvannføring.

Som sagt, vet vi ikke om fordelingen har en maksimalverdi. Alt vi vet, er at hvis vi henter X antall realisasjoner fra fordelingen, vil de ha en maksimalverdi. Men maksimalverdien for et knippe realisasjoner fra en stokastisk variabel vil typisk være gjenstand for stor varians. Det er derfor min anbefaling at man i minst mulig grad ser på denne statistikken. Kanskje aller helst burde det å se på maksimalverdien være en opsjon som default var slått av.

Siden man har et sett av tappinger man ser på, får man en kurve for hver av statistikkene man ser på, nemlig maksimalverdi, 90%-persentil (bestemmende) og median. Resultatet kan se ut som i figur 10, som er hentet fra gammelt reguleringskurve-program. Hvordan slike grafer benyttes videre er opp til brukeren, men jeg forstår det slik at brukes når kraftverkskonsesjoner lages.



Figur 10: Reguleringskurve for stasjon Nor (2.2.0) fra gammelt reguleringskurve-program.

4 Problemer og løsningsforslag

4.1 Hvor problemene ligger

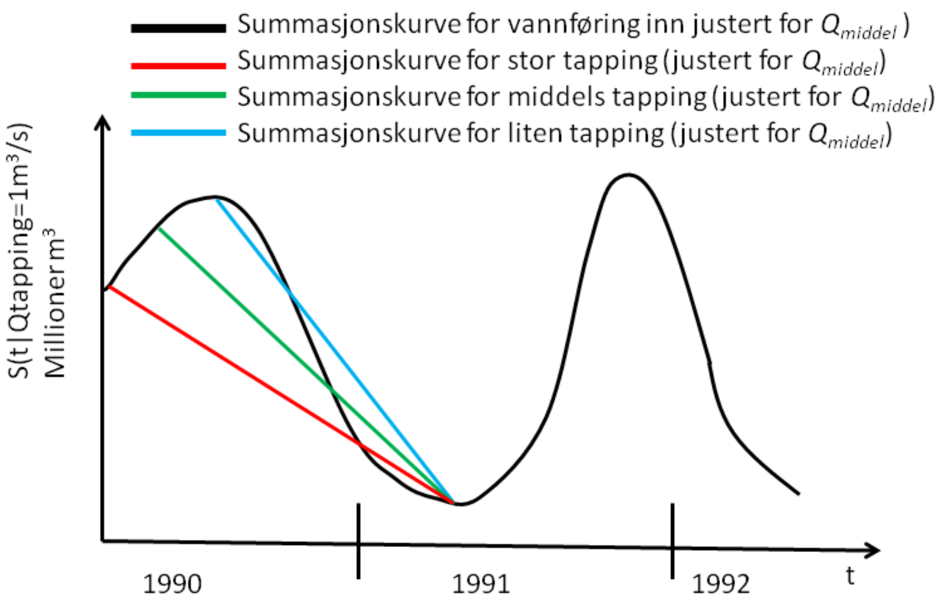
De tekniske problemene med reguleringskurver ligger ikke bruken av årsmaksimaler i selve reguleringskurven (selv om visningen av maksimalverdier er problematisk). Prinsipielt anser jeg det som et stort problem at summasjonskurver brukes direkte til å spesifisere ”optimale” løsninger. Disse løsningene på spesifisering av tappestrategi fungerer kun fordi kurven spesifiserer vannføringsforløpet i det som er å anse som fremtiden for starten av hver tapping. En statistisk tilnærming til fremtiden, der vannføringsprosessen ble tilpasset data ville jeg anse som mer fornuftig, men dette er en prinsipiell sak som jeg vil la ligge nå.

Det ligger likevel flere problem i måten man går fra summasjonskurve til årsmaksimaler for hver spesifisert minimumsvannføring (tapping). Jeg vil gå igjennom de problemene jeg selv ble klar over under implementering av ny reguleringskurve. Dette vil bli brukt til å motivere den løsningen jeg har endt opp med.

4.2 Problemet med å bruke summasjonskurve justert for middelvannføring

I ref (1) og (2) brukes summasjonskurve justert for middelvannføring for enhver minimumsvannføring (tapping) man ser på. Dette medfører problemer. Hvis man ser på figur 8, er den slik laget at justert summasjonskurve hele tiden krummer nedover, bortsett fra i den årlige minimumsverdien, der kurven har en knekk. Dette gjør at alle linjer man trekker bakover fra dette punktet som i det hele tatt krysser grafen (med andre ord som spesifiserer en tapping som ikke selv tidsseriens minimale vannføring tilfredsstiller og som derfor krever en viss magasinering) ligger under summasjonskurven helt til denne blir krysset.

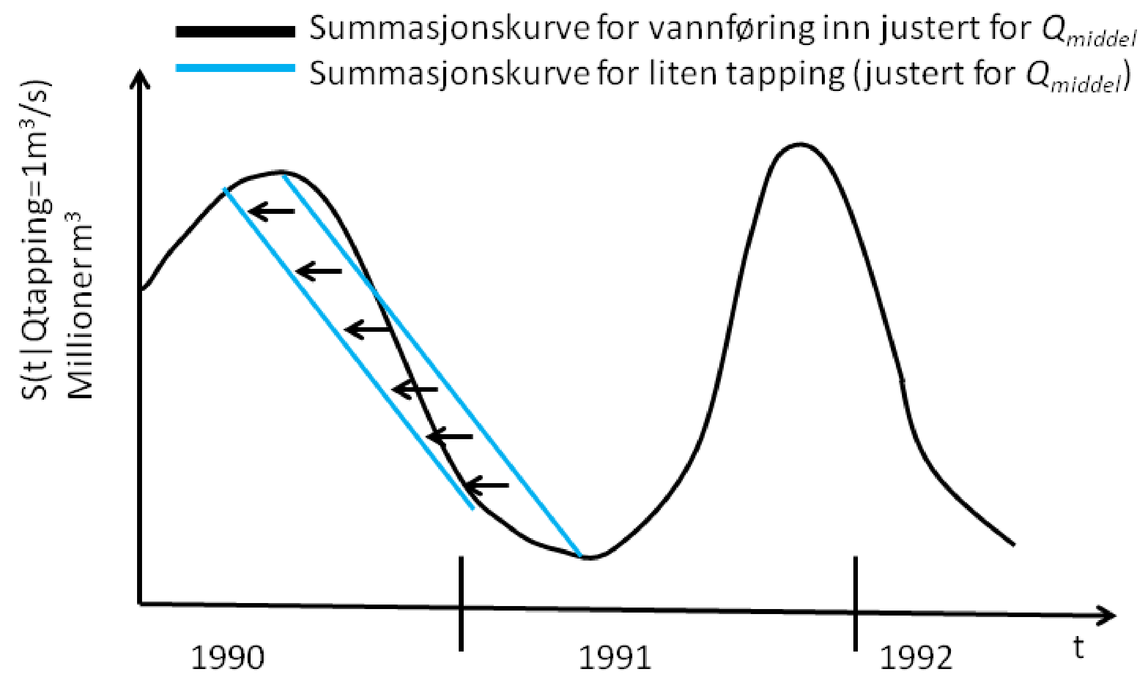
Dette er ikke noe som trenger være tilfredstilt i naturen. Man kan gjerne (alltid?) gå fra liten til stor vannføring gradvis, noe som innebærer at minima til summasjonskurven justert for middelvannføring vil krumme oppover. Med andre ord, vi bør anta at summasjonskurven er glatt (med andre ord er kontinuerlig og med kontinuerlig derivert, som igjen er vannføring minus justering). Dette igjen innebærer at enhver linje man trekker fra minima og bakover og oppover (med andre ord som spesifiserer en tapping mindre enn middelvannføringen) vil nødvendigvis ligge over summasjonskurven for den innkommende vannføringen nær minima, se fig. 11. (Matematisk sett skjer dette fordi minima for summasjonskurven har derivert lik null mens tappingen har negativ derivert. Ser man derfor på tidspunkt mindre enn minima, må disse ligge høyere rett til høyre for minima for tappingen enn for summasjonskurven.) Men summasjonskurven for vannføring ut skal ikke ligge over summasjonskurven for vannføring inn, da er man nede i negative magasinvolum!



Figur 11: Illustrasjon av hvordan tappinger som ender i minima for summasjonskurve justert med middelvannføring må ligge over summasjonskurven selv i et lite tidsintervall før minima.

Løsningen kunne grafisk være å parallell-forskyve tappelinjene til venstre til de bare så vidt touchet summasjonskurven, nær minima, se fig. 12. Det vil si å trekke linjen bakover fra tangentpunktet med summasjonskurven. Men å forholde seg til tangenter gjør rutinen adskillig mer komplisert.

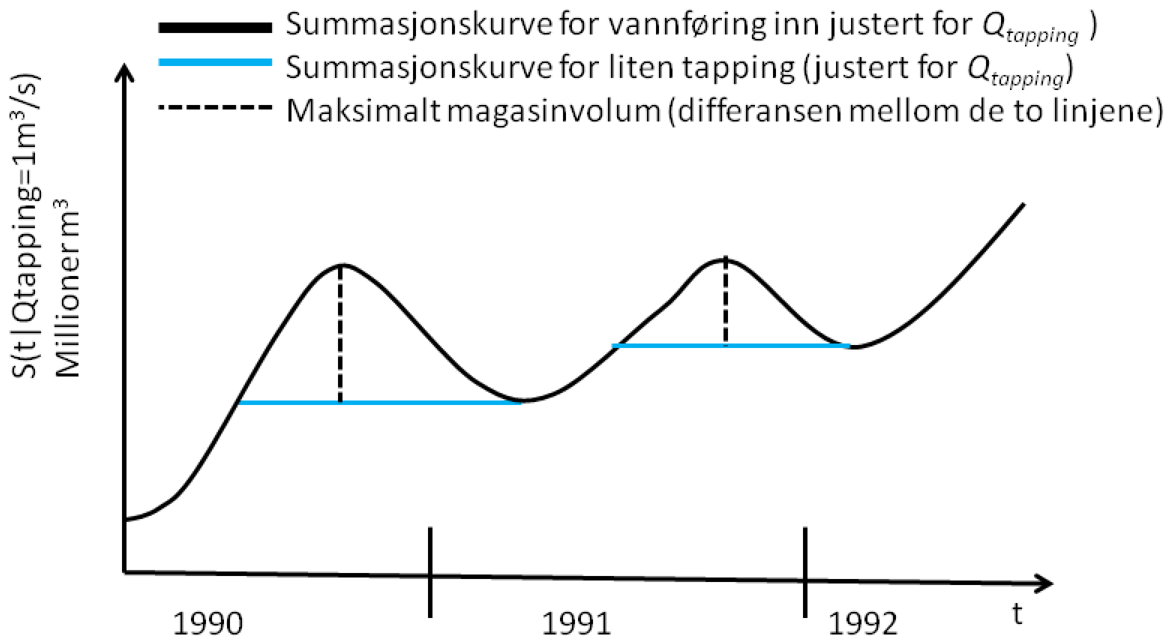
Heldigvis er tidspunktet til tangentpunktet til den parallell-forskyvde linjen er lik tidspunktet for minima for summasjonskurven justert med tappingen! Det kan man se ved følgende observasjoner: (1) Tappingen selv vil være representert med en vannrett linje for en summasjonskurve justert med tappingen (siden $S'(t)=Q(t)-Q_{juster}$, se kapittel 2.2, og Q(t) for tappingen er lik selve tappingen, $Q_{tapping}$, og $Q_{juster}=Q_{tapping}$.). (2) Et minima i $S(t\,|\,Q_{tapping})$ vil nødvendigvis ha derivert=0, med andre ord også lokalt sett være en vannrett linje. At summasjonskurven og tappingen er parallell justert for tappingen følger for øvrig av at de per konstruksjon er parallell justert for middelvannføringen, siden justering forandrer den derivert til to grafer likt på hvert tidspunkt. (3) Når man parallell-forskyver linjen til venstre, må tangent nødvendigvis treffe summasjonskurven på et punkt der den fremdeles krummer oppover. Krummer summasjonskurven justert for middelvannføring oppover, må summasjonskurven justert for tappingen gjøre det samme for samme tidspunkt. Men et punkt i en glatt graf som har null derivert og krummer oppover er et minimum.



Figur 12: Parallell-forskyvning av tapping fra minima til tangentpunkt.

Dermed får man en alternativ metode for å gjøre det samme som parallell-forskyvningen, nemlig den enklere oppgaven med å identifisere årlige minima i summasjonskurve justert for tappingen, se fig. 13. Tappestrategien dannes da ved å trekke en vannrett linje til venstre til man treffer summasjonskurven (justert med tappingen man ser på). Siden dette bare er en annen representasjon av summasjonskurven justert for middelvannføring med parallell-forskyvet tappelinje, vil tappingen starte på samme tidspunkt som hvis man løste problemet med parallell-forskyvning.

Årsmaksima for magasinvolum (stiplet linje i fig. 13) finner man enkelt ved å identifisere maksima i summasjonskurven inne i årets tappeperiode og trekke fra nivået på tappingens summasjonskurve (nivået på den vannrette linjen). Dette gjør at det er forholdsvis enkelt å illustrere og forstå metoden.



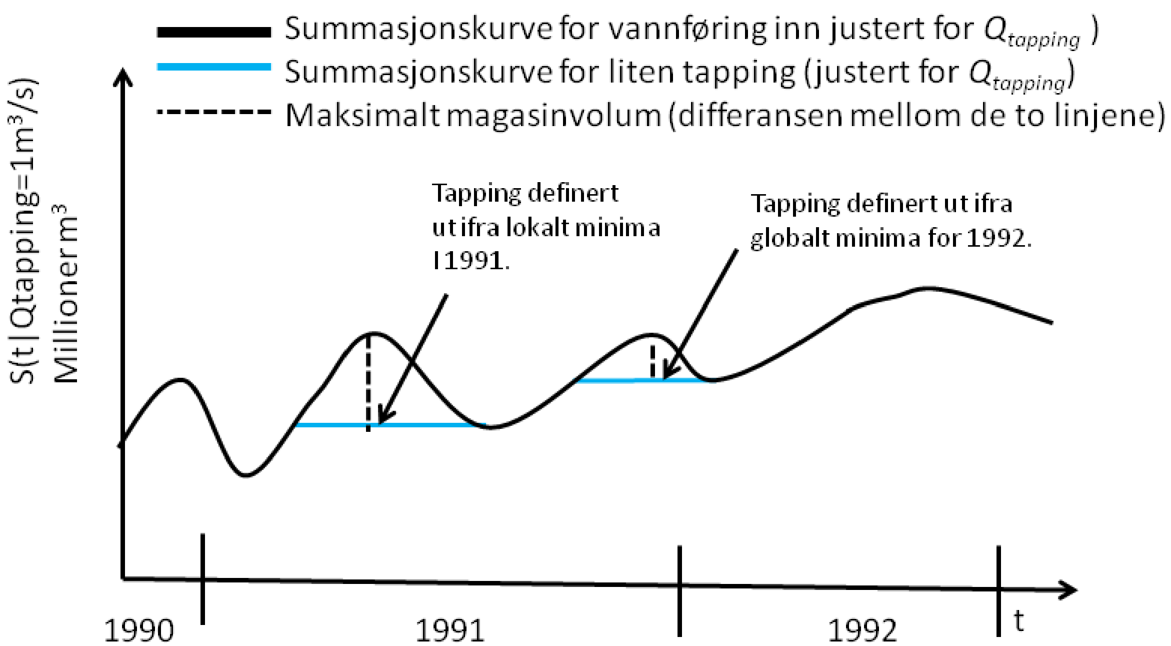
Figur 13: Tapping i summasjonskurve justert for den samme tappingen.

En ulempe med metoden er at man må konstruere en ny summasjonskurve for hver tapping man skal se på i reguleringskurven. Men konstruksjon av en summasjonskurve er forholdsvis fort gjort og kan ikke forventes å ta mer tid enn den gjennomgangen man uansett må ta for å finne tangentpunkt og finne hvor tangenten skjærer summasjonslinjen, som er det som må gjøres skal man fortsatt bruks summasjonskurve justert for middelvannføringen.

Et av de elementene jeg tror jeg forstod med beskrivelsen i referanse (3) var at man der faktisk brukte summasjonskurve justert for tappingen hellers enn middelvannføringen. Jeg anser det som en støtte for at en slik strategi er fornuftig.

4.3 Problemet med multiple lokale minima

Det å bruke summasjonskurven justert for den minimale vannføringen (tappingen) man ønsker å se på løser et problem, hellers enn justert for middelvannføringen, løser ett problem. Men det gjør det også enklere å se et nytt problem. Det trenger ikke nødvendigvis bare være ett lokalt minima per år. Man har riktignok et årlig (globalt) minima likevel, men det kan hende at maksimalt magasinvolumet man får fra tidsintervallet definert av dette er mindre enn det maksimale magasinvolumet assosiert med et annet lokalt minima, se fig. 14. Som man kan se, er tappingen som skjer i 1991-1992 før globalt minima i 1992 assosiert med en mindre magasinering enn tappingen som skjer før siste lokale minima i 1991. Hadde man derfor kun benyttet årlige globale minima, ville man derfor endt opp med tappestrategier som i tidsperioder hadde vannføring ut som var mindre enn tappe-grensen. Og man ville endt opp med årlige maksimalvolum som lett kunne bli for små.



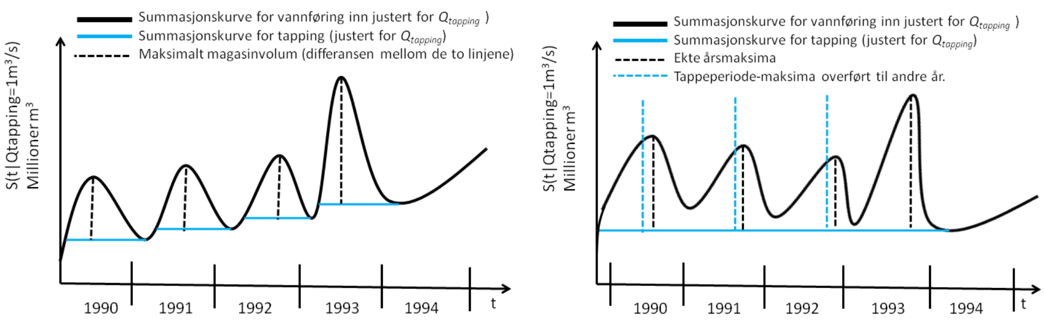
Figur 14: Eksempel på multiple lokale minima i summasjonskurven inne i et år og hvordan disse kan definere opp større magasineringsvolum enn det globale årsminima gjør.

Dette kan i utgangspunktet ses på som et enkelt løsbart problem. Man konstruerer en vannrett linje bakover fra **<u>hvert</u>** lokalt minimum man finner på summasjonskurven justert for tappingen og forlenger den til den skjærer med summasjonskurven igjen, noe som definerer en tappingsperiode. Man finner så toppen i summasjonskurven for hver tappeperiode, og putter den i listen over lokale maksimale volum for det året toppen tilhører. Man finner så det største lokale maksimale volum for hvert år og returnerer dette til reguleringskurven, som så går videre til neste tapping som skal undersøkes. I tilfellet illustrert i fig. 14, ville man dermed ende opp med å rapportere volumet fra den første toppen hellers enn den siste (assosiert med globalt årsmaksima) for året 1991.

Merk at selv om en tappeperiode varer over flere år, vil årsmaksima likevel være års-spesifikke. Altså, selv om man tapper en fast verdi og magasinerer resten, vil det nødvendige magasinvolumet være forskjellig fra år til år. Dette mener jeg er slik logikken bør være, siden poenget er å finne ut hvor stort magasin man ville trengt **<u>hvert år</u>**. Logikken i (3) ser ut til å angi kun ett maksimum for hele tappeperioden og tilegne hvert år som tilhører denne tapperperioden dette maksimumet. Dog er det vanskelig å si for sikkert at dette er logikken, men det kan at medianene generelt ligger høyere for store tappingen i gammel logikk enn i ny. Dette er for øvrig den eneste systematiske forskjellen jeg ser i ny og gammel logikk.

Merk at antall slike minima for hvert år kan variere med varierende tapping, noe som gjør at justering med tapping blir helt essensielt.

Merk også at en logikk som benytter seg av kun ett maksima per tappeperiode i utgangspunktet (men henter ut maksimal tappe-periode-maksima når det er flere tappeperioder inne i året) heller enn per år, vil føre til diskontinuiteter i reguleringskurven. Dette kan ses ved et tenkt tilfelle der man er nære ved å slå sammen flere tappeperioder og der en av tappeperiode-maksimaene er mye større enn de andre, se fig. 15a. Når man så går for litt større tapping, blir tappeperiodene sammenslått. Har man så logikk på tappeperiode-maksima som triumferer over logikk for årsmaksima, vil den største toppen i summasjonskurven "slå inn over" alle årene i tappeperioden og fordelingen til årsmaksima forandres radikalt.



Figur 15: a) Årlige tappeperioder med årlige maksima. b) Økning i tapping gjør at det blir en tappeperioden for de 4 årene 1990-1993. Hvis man i stedet for å bruke hver enkelt års maksima nå brukte maksima for hele tappeperioden i hvert år, ville det medføre en drastisk endring i fordelingen av årsmaksima.

Det gamle regulerinskurveprogrammet, REGKURV, bygd på logikken til Riise og Wingård (3), later til å ha hatt en slik logikk. For å få reguleringskurvene til å se pener ut, ble en glatting gjort i etterhånd. Med en logikk som ser på årene hver for seg, uansett om tappeperioden er inneholdt i året eller brer seg mer utover, vil så langt jeg kan se ikke ha et slikt diskontinuitetsproblem og vil dermed ikke behøve ad-hoc-løsninger for å pynte på resultatet.

4.4 Gjennomgangsrekkefølge

Det kan virke naturlig at man går igjennom data for å bestemme tappestrategien (summasjonskurve for vannføring ut) fra start til slutt. Men bestemmelse av tappestrategi gjøres ved at man identifiserer minima og jobber seg bakover til det punktet på summasjonskurven hvor den har lik verdi som i minimaet. Dermed blir man sittende med en logikk som først jobber seg fremover og så bakover igjen. I stedet kunne man starte fra slutten og jobbe seg bakover konsekvent.

Jobber man seg fremover globalt sett, kan man forestille seg at mens man jobber seg bakover fra et minima for å bestemme en tappeperiode plutselig støter borti en ny tappeperiode. Skulle man da bare stoppe der, eller fortsette til man finner summasjonskurve. Og hvis man jobber seg bakover globalt sett, kan det hende at mens man jobber seg bakover fra et minima finner nye minima. Skal disse ignoreres, slik at man leter tak i neste minima fra der forrige tappeperiode startet, eller bør man etter å ha funnet en tappeperiode jobbe seg bakover fra slutten av denne for å finne nye minima og nye tappeperioder? Strategivalgene er altså følgende:

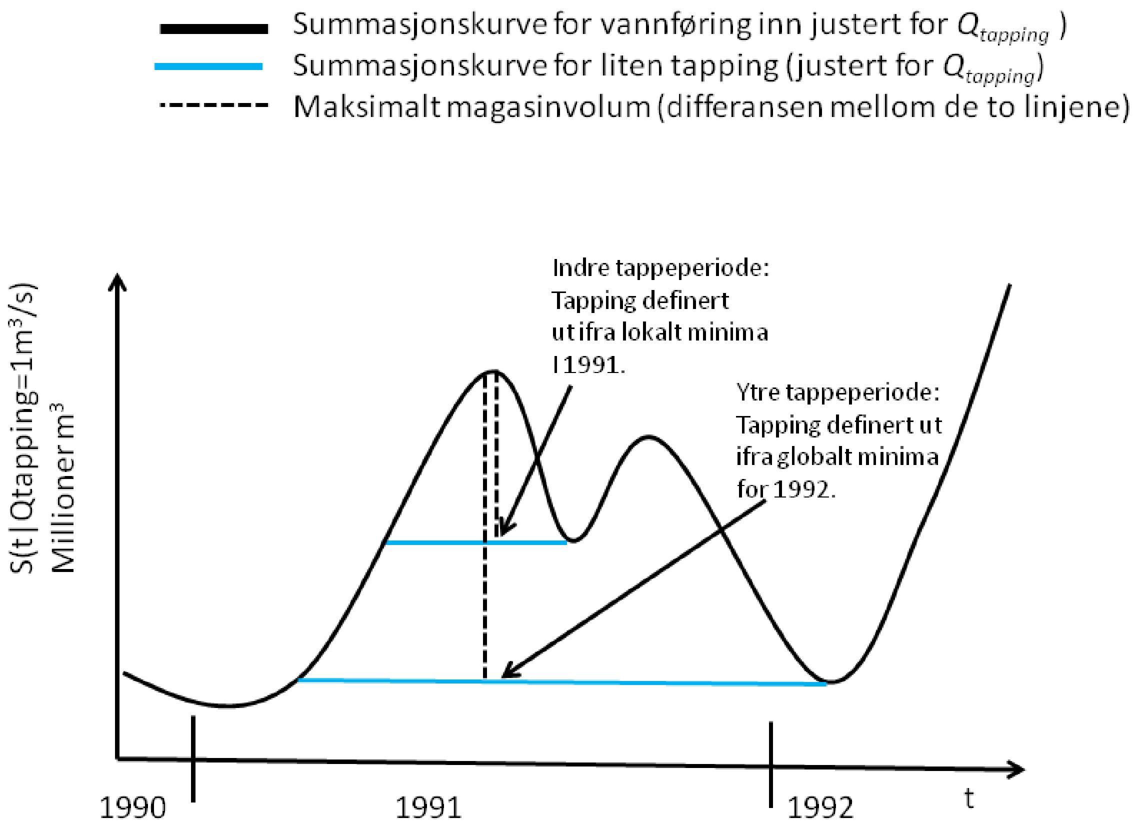
a) Let etter minima fra start til slutt. Identifiser alle tappeperioder fra minima og bakover til man krysser summasjonskurven.
b) Let etter minima fra start til slutt. Identifiser alle tappeperiode fra minima og bakover til en av to ting skjer (1) man krysser summasjonskurven (2) man finner et annet minima (slutten på en annen tappeperiode).
c) Let etter minima fra slutt til start. Identifiser alle tappeperioder fra minima og bakover til man krysser summasjonskurven.
d) Let etter minima slutt til start. Identifiser en tappeperiode fra minima og bakover til man krysser summasjonskurven. Let så bakover fra tappeperiodens start etter neste minima. (Ignorer andre minima inne i tappeperioden man jobber med).

Strategi (a) og (c) vil gi identiske resultater, siden alle tappeperioder blir håndtert, men strategi (b) og (d) kan oppføre seg annerledes. Hvilken av dem er best? Neste problem vil heldigvis kunne besvares ved også å besvare dette spørsmålet.

Når tappeperiodene på det ene eller andre viset er funnet, kan man finne maksimal forskjell mellom summasjonskurve til vannføring inn og ut (= maksima-minima på summasjonskurven i tappeperioden) for hvert år inne i tappeperioden og finne den største av hver maksima innen hvert år. Dette gir da samlingen av årsmaksima for nødvendig magasinvolum, som er det som trenges for å lage reguleringskurver.

4.5 Problemet med overlappende tappingsperioder

Problemet med å gå gjennom hvert lokalt minima og definere tappeperioder ut ifra disse er at en tappeperiode kan omslutte en annen. (At dette er eneste måte at tappeperioder kan overlappe hverandre, kan man overbevise seg selv om ved å se på hvordan *tappeperioder* er definert og holde kontinuiteten til summasjonskurven i mente.) Se fig. 16 for et eksempel der en tappeperiode omslutter en annen. Det er klart at den minste tappeperioden, som omsluttes av den større, er irrelevant. Den ytre tappeperioder spesifiserer uansett hva summasjonskurven til vannføring ut bør være innenfor sitt tidsintervall.



Figur 16: Eksempel på at en tappeperiode kan omslutte en annen.

Hvis man forsøkte å modifisere summasjonskurven for vannføring ut til å følge linjen definert av den indre tappeperioder, måtte man i en periode etterpå gå nedover til linjen definert av den ytre tappeperioden, noe som betyr mindre vannføring enn den vi ønsker. Husk, ethvert negativt stigningstall i summasjonskurven for vannføring ut, representerer en vannføring som er mindre enn justeringen, og justeringen er i dette tilfelle minimal tillatt vannføring (tappingen). Dermed er strategi (b) utelukket. En slik strategi ville innebære at summasjonskurve for vannføring inn ikke ville ta hensyn til den nødvendige tappingen i starten av ytre tappeperiode. Etter at indre tappeperiode er ferdig, skulle summasjonskurven for vannføring ut hoppe ned til verdien spesifisert av ytre tappeperiode, men det går ikke an, fordi et slikt diskontinuerlig sprang nedover ville representere en negativ vannføring (og definitivt en vannføring mindre enn spesifisert minste vannføring).

Strategi (a) og (c) resulterer i at både indre og ytre tappeperiode blir rapportert. Den indre tappeperioden resulterer i et maksimalt volum som er mindre enn det tilhørende den ytre tappeperioden for samme år. Dette kunne håndteres på forskjellig vis. Man kunne lage en metodikk for å "skyte ut tappeperioder", som ref (3) ser ut til å gjøre. Det er i så tilfelle den indre tappeperioden som ville blitt fjernet. En annen metode er å rapportere maksima for begge, og la algoritmen for å finne største volum inne i et år ta seg av det å fjerne virkningen av den indre tappeperioden. Visualisering av en slik metode, enten man går for den ene eller andre løsningen, vil uansett være litt innfløkt.

Heldigvis tar strategi (d) seg av dette problemet uten at man trenger å innføre noe ekstra logikk. Dermed har man en forholdsvis enkel og visualiserbar måte å beregne årsmaksimaler, som vil bli beskrevet i det påfølgende kapittelet.

5 Pseudokode for løsning

Løsningen jeg har kommet fram til kan oppsummeres med følgende pseudokode:

For hver tapping man skal se på (si 0% til 100% av middelvannføringen i steg på for eksempel 1%):

1. Lag summasjonskurve for innkommende vannføring justert med tappingen. (Bruk triangulærmetoden for numerisk integrasjon.)
2. Lag summasjonskurve for utgående vannføring justert for den samme tappingen.
3. For hvert år inne i datasettet (man kan ekskludere eller inkludere ukomplette start-/slutt-år), finn maksimalforskjellen mellom de to summasjonskurvene.
4. Finn total-maksimum, 90%-persentil og median for settet av årsmaksimaler. Vis i kurven.

Subrutine 1, 3 og 4 bør være klar nok fra beskrivelsen, men vi kan ekspandere punkt 2 til:

2. Lag summasjonskurve for utgående vannføring justert for den samme tappingen:

For hvert tidspunkt i innkommende vannføringstidsserie fra **slutt til start**:

a) Hvis verdien på gjeldende tidspunkt på summasjonskurven for innkommende vannføring er mindre enn minste verdi for summasjonskurve for utgående vannføring **sett så langt**, sett verdi for summasjonskurve for utgående vannføring lik verdi for summasjonskurve for innkommende vannføring. Hvis ikke, sett verdien for summasjonskurven for utgående vannføring lik minste verdi sett så langt.

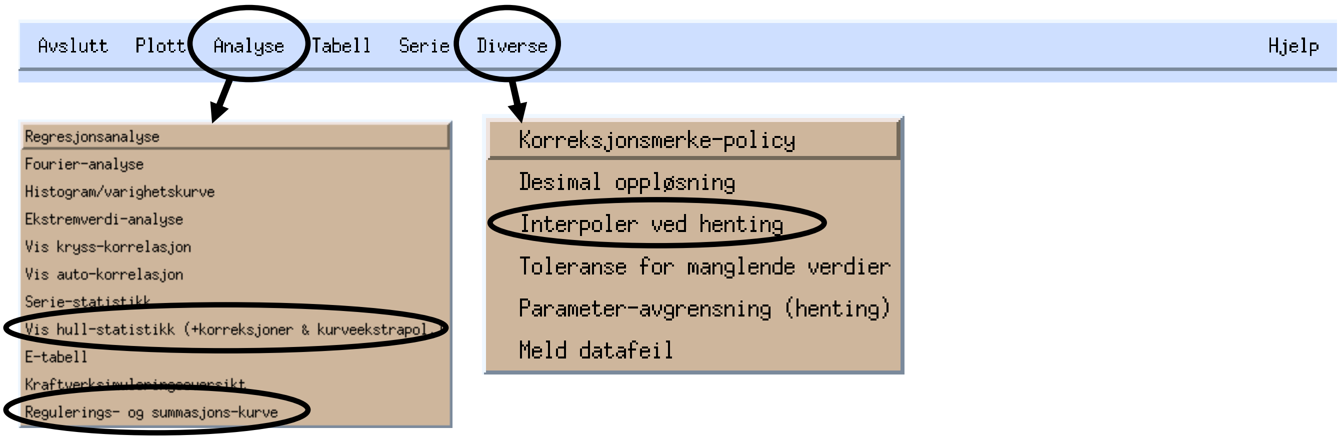
Denne koden er implementert i koden til START-systemet, i kodefilene hydra/source/sysub/storage_yield.C/H.

Merk at denne koden ikke forholder seg til begrepet "tappeperiode" i det hele tatt (selv om det kan konstrueres fra der man har forskjeller mellom summasjonskurve til innkommende og utgående vannføring).

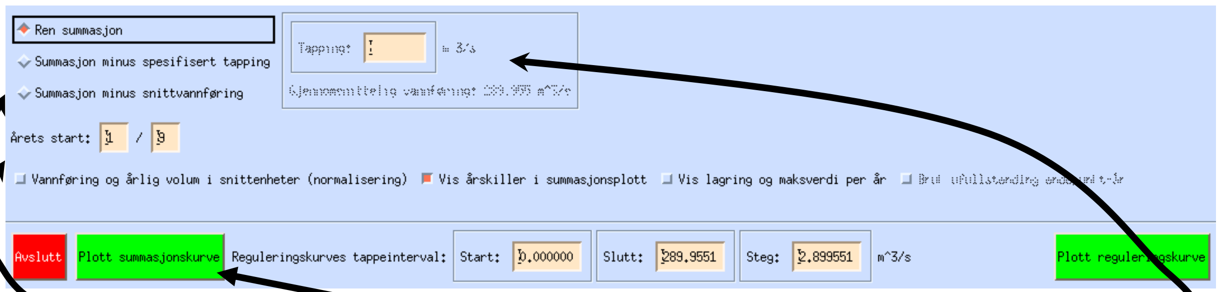
Koden for punkt 3 kan være litt kilen fordi man må forholde seg til årsskiller forskjellig fra kalenderåret, samt fordi det kan være ønskelig å ta med ukomplette start- og slutt-år.

6 Grafisk grensesnitt

Koden er brukt i en grafisk modul kalt 'storage-yield_module' i filene hydra/source/motifsysub/StorageYieldCurve.C/H. Denne modulen er inkorporert i DAGUT og FINUT, under menyvalget "Analyser -> regulerings- og summasjonskurve". Merk at tidsserien må være fri for hull (men man kan ha manglende verdier i starten/slutten av tidsserien). Man kan sjekke hull i menyvalget "Analyser ->Vis hullstatistikk" og man kan gjøre noe med problemet ved å velge "Diverse -> interpoler ved henting" i DAGUT eller "Diverse -> interpoler over hull" i FINUT.



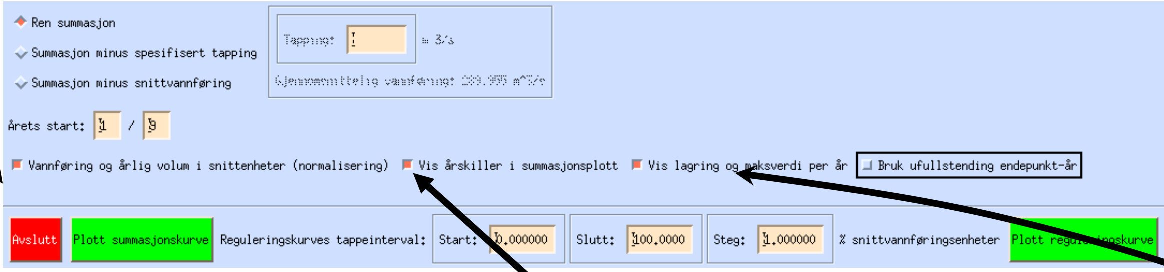
Når man starter opp den grafiske modulen for regulerings- og summasjonskurver, kommer følgende vindu opp:



De øverste opsjonene har med visning av summasjonskurve og hvordan denne skal justeres hvis den skal vises. Skal man justere summasjonskurven ifølge en gitt tapping (dette må oppgis i m^3/s, men middelvannføringen er gitt) må dette settes her:

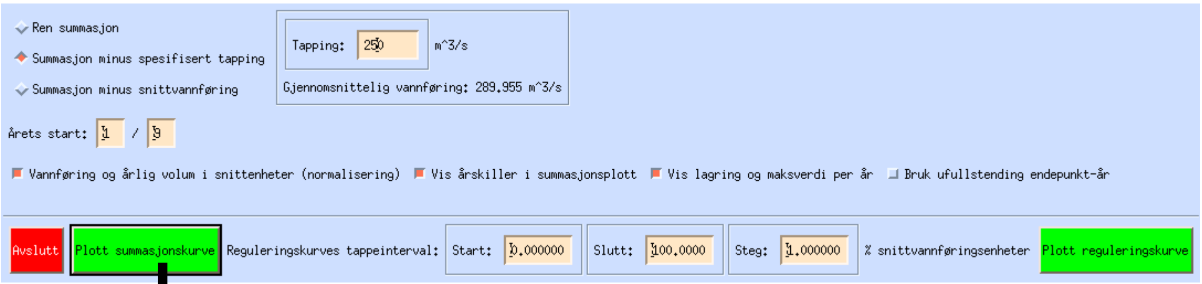
Årets start/og slutt kan settes, både for regulerings- og summasjonskurvens del. Summasjonskurven vil vise starten på hvert år ifølge det brukeren setter. Default er dette satt til 1/9, som hvis nok er standard-definisjonen på et "hydrologisk år". Et år vil gis navn etter kalenderåret det starter i.

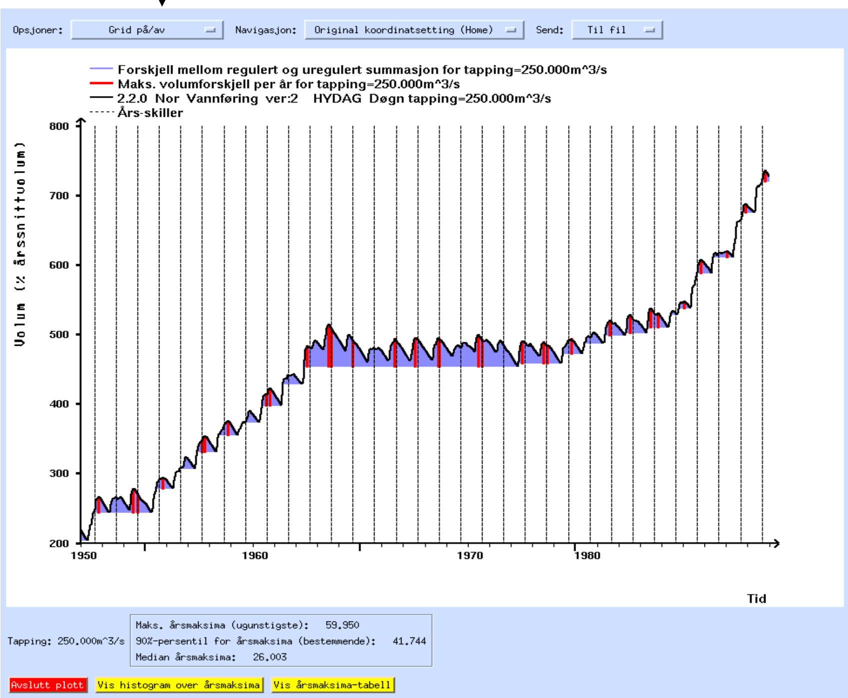
Man kan velge om man vil ha ekte enheter (m^3/s og millioner m^3 for vannføring og volum henholdsvis) eller prosentvise enheter (normalisert i forhold til middelvannføring eller midlere årsvolum for tappinger og nødvendige volum/summasjonskurver, henholdsvis). Default er normaliserte enheter.



Summasjonskurven vil typisk plottes med årskiller. Om man vil, kan man også plotte den med forskjellen mellom summasjonskurve for innkommende og utgående vannføring samt vising av maksimalforskjellen for hvert år (årsmaksima). Dette vil gi en grafisk pekepinn på hvordan tappeperioder blir definert og årsmaksimaene blir beregnet.

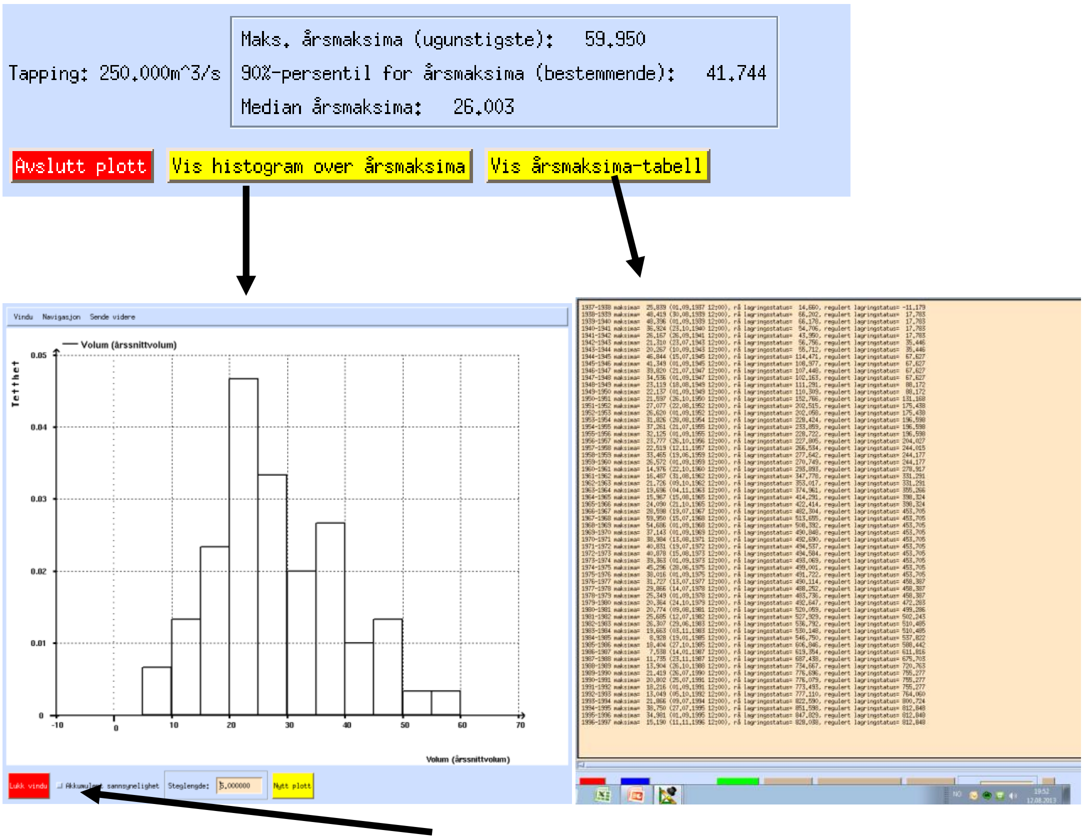
Ved å trykke på "plott summasjonskurve" kan man så se en slik summasjonskurve. Her har jeg valgt å justere med tappingen $200m^3/s$ (rundt 87% av middelvannføringen) og jeg ønsker å se lagring og årsmaksimaler samtidig, slik at jeg kan forstå hvordan reguleringskurven beregner sine verdier for denne tappingen.





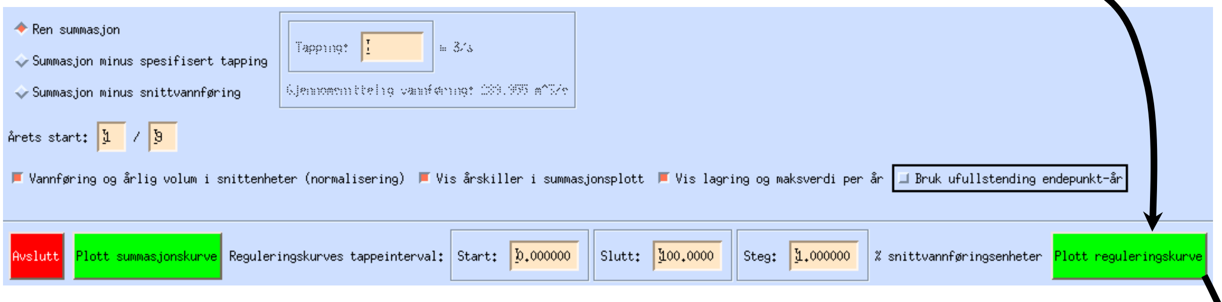
Den tykke svarte linjen er summasjonskurven for vannføring inn. Den nedre kanten på det blå skraverte området er summasjonskurven for vannføring ut. Forskjellen er visualisert med det blå området. For hvert år er en rød linje vist som representerer årsmaksima (nødvendig magasinvolum det året, altså forskjellen mellom summasjonskurve for innkommende og utgående vannføring). Disse kan ofte befinne seg på starten av året, hvis den justerte summasjonskurven er generelt sett synkende det året eller på slutten, hvis summasjonskurven er generelt økende det året. (Dette er forutsatt at hele året er inne i en tappeperiode.)

Hvis man har valgt å se på årsmaksima, vil man se maksimal, 90%-persentil (bestemmende) og median årsmaksima for den spesifikke tappingen. Dette vil altså gi punkt på reguleringskurvene for den spesifiserte tappingen. Man kan i så tilfelle fra summasjonskurve-vinduet også se histogrammet over årsmaksima, samt en tekstlig tabell som viser all informasjon om hver årsmaksima (tidspunkt, volum og verdi for summasjonskurven til innkommende og utgående vannføring). Dette kan gi en ekstra pekepinn på hvordan verdiene i reguleringskurven blir beregnet.

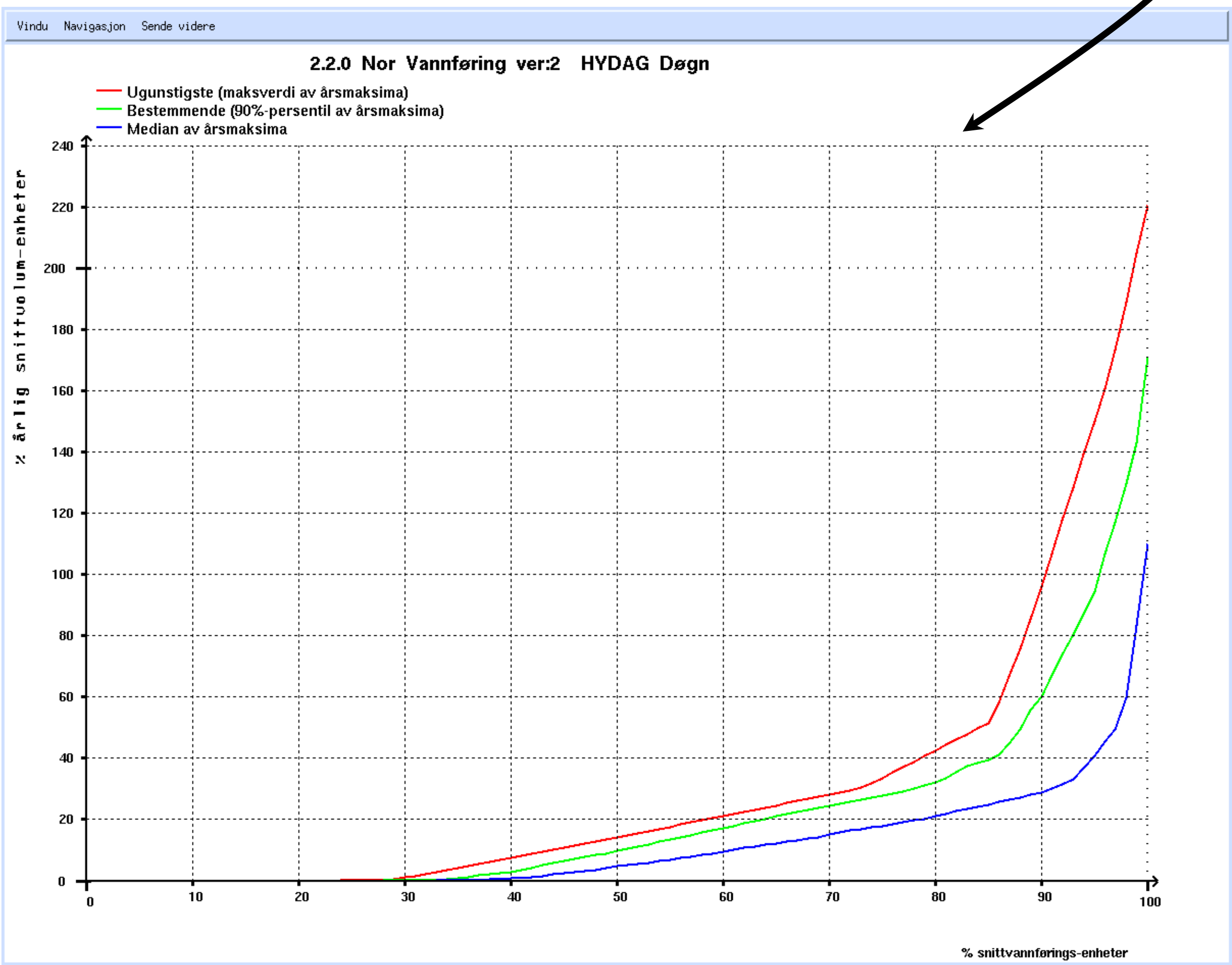


Merk at histogrammet har en opsjon som viser kumulativ fordeling. Dette gjør det ekstra lett å se hva ulike persentiler skal være. (I så tilfelle kan det lønne seg å sette steglengden i histogrammet mindre enn det som er default.)

Lengst nede til høyre er knappen for å beregne reguleringskurve.

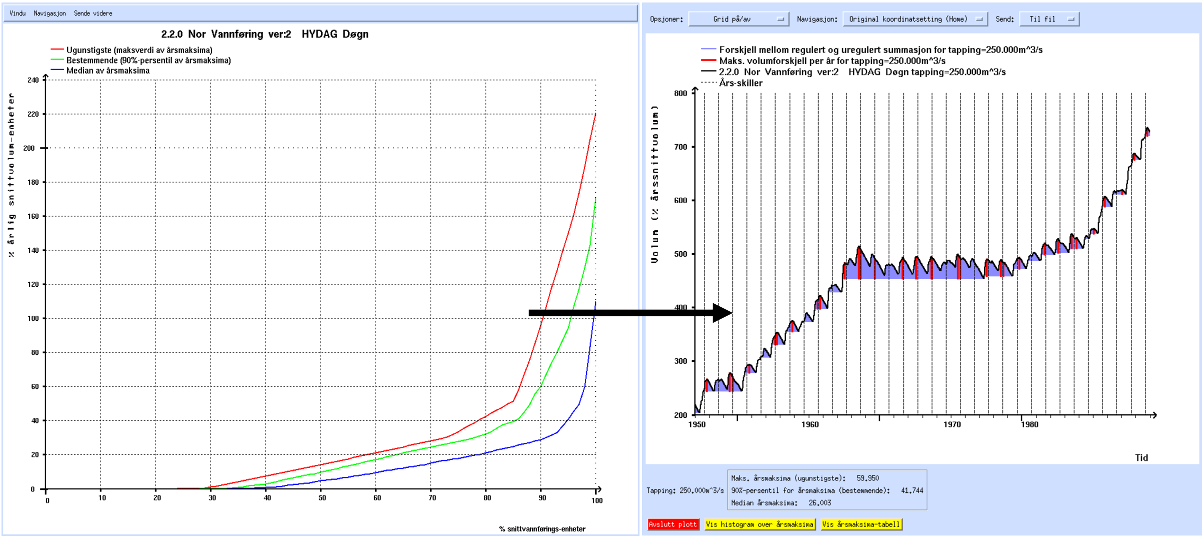


Merk feltene foran denne knappen, der man kan bestemme hvor detaljert man skal gå til verks hva gjelder å se igjennom ulike tappinger. Man setter her start-, slutt og steglengden, enten i m3/s eller % av middelvannføringen, alt ettersom normalisert er slått av eller på. Default er start satt til 0%, slutt til 100% og steglengden satt til 1%, som betyr at 101 tappinger blir gjennomgått. Resultatet av en slik kjøring vises i fig. 17.



Figur 17: Reguleringskurve for stasjon Nor (2.2.0)

Som man ser, får man en del linjestykker oppover på hver av grafene, som for det meste ser ut til å krumme oppover på slutten. Til forskjell fra gamle programmer, kan man gå over 100% årsavrenningsvolum i nødvendig magasinvolum i denne grafen. Grafen er vist via vår vanlige plottemodul. Dermed er alle opsjoner i denne er tilgjengelig, slik som zooming og forandring av graf-farger, stipling, tykkelse og linjetekst. Plottet har likevel en ekstra egenskap. Hvis man klikker midtre mustast en plass i plottet, vil summasjonskurven for den korresponderende tappingen vises med alle opsjonene for visning av tappeperioder og årsmaksimaler.



Figur 18: Overgang fra reguleringskurve til summasjonskurve for spesifisert tapping via midtre mustast.

7 Oppsummering

En forholdsvis enkel metode for kalkulering av summasjonskurve-basert reguleringskurve er funnet. Metoden ser ut til å ta hånd om de mest umiddelbare problemsituasjonene man kan tenke ut.

Det ser også ut til å være enkel å visualisere hvordan algoritmen fungerer, noe som gjør at man kan undersøke i detalj hvordan et punkt i grafen er blitt beregnet. Dette burde gjøre feilsjekking og undersøkelser av uventet oppførsel i grafen mye enklere. Det vil også bety at brukeren kan få et mer aktivt forhold til hvordan disse kurvene er beregnet.

-Trond Reitan, 14/8-2013

8 Bibliografi

1. Hydrologi i praksis, J. Otnes og E. Ræstad (1971), kapittel 3.4 (summasjonskurven) og 3.5 (reguleringskurven).
2. Grunntrekk av hydrologien særlig Norges hydrologi, H. Klæboe (1962), kapittel 3 (hydrologiske beregninger og grafiske metoder).
3. Sammenheng mellom magasinstørrelse og regulert vannføring – EDB og tradisjoner, U. Riise og B. Wingård (1978), Meddelese nr. 39 fra Hydrologisk avdeling.