

Regional metodikk for estimering av lavvanns- karakteristika

Hege Hisdal, NVE

7
2005

RAPPORT MILJØBASERT VANNFØRING



Regional metodikk for estimering av lavvannskarakteristika

Norges vassdrags- og energidirektorat

2005

Rapport nr. 7 - 2005

Regional metodikk for estimering av lavvanns-karakteristika

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Forfatter: Hege Hisdal, NVE

Trykk: NVEs hustrykkeri

Forsidefoto: Leirungsåi, Jotunheimen, v/ John Brittain

ISSN: 1502-234X

ISBN: 82-410-0565-2

Sammendrag: Dagens vassdragsforvaltning må ta hensyn til flere bruker-interesser enn tidligere. Økt konkurranse om vannet har økt etterspørselen etter informasjon om naturlig lavvannføring. I prosjektet har det derfor vært viktig å sette fokus på lavvann generelt, vurdere bruken av ulike lavvannsindekser til ulike formål og å sammenlikne ulike metoder for å estimere lavvannsindekser i nedbørfelt med få eller ingen observasjoner av vannføringen. Det har også blitt fokusert på hvordan man kan tilrettelegge metodikk i brukervennlige applikasjoner for bruk i saksbehandlingen i forvaltningen.

Rapporten gir et sammendrag av prosjektet '*Regional metodikk for estimering av lavvannskarakteristika*', inkludert hovedkonklusjoner og anbefalinger. I tillegg er enkelte publikasjoner fra prosjektet gitt som vedlegg.

Emneord: Lavvann, estimering i umålte felt, regional regresjon, regional indeksmetode, nedbør-avløpsmodell, programvare, minstevannføring.

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Oktober 2005

Innhold

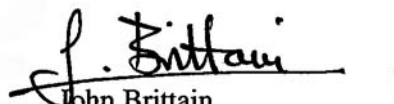
Forord	7
Sammendrag	9
Referanser	13
Vedlegg 1 <i>Thomas Væringstad, Hege Hisdal, Turid-Anne Drageset</i> Estimation of low flow indices at ungauged sites, case study from Norway	15
Vedlegg 2 <i>Thomas Skaugen</i> Estimating rating curves and response functions from basin geometry and flow velocity	25
Vedlegg 3 <i>Hege Hisdal, Lena M. Tallaksen, Frode Randen</i> Regional low flow and drought frequency analysis	33
Vedlegg 4 <i>Marit Astrup</i> Eksempel og programbeskrivelse delprosjekt 2: Endringer i hydrologiske regimer ved inngrep i uregulerte vassdrag	35

Forord

For å få økt kunnskap om virkningen av sterkt redusert vannføring i forbindelse med inngrep i vassdrag, må man kjenne den naturlige vannføringen i vassdraget. Slik kunnskap er viktig i forbindelse med nye vassdragskonsesjoner, revisjon av vilkår i gamle konsesjoner, og som følge av den nye vannressursloven og EUs vanndirektiv. Ofte har fokus vært effekten av inngrep på flommer og middelvannføring, i mindre grad på lavvannføringene. I prosjektet 'Regional metodikk for estimering av lavvannskarakteristika' (2002-2004) har en sett på egnetheten av ulike lavvannsindekser og mulighet for å estimere disse i nedbørfelt med få eller ingen observasjoner av vannføringen. Dessuten er det utviklet metodikk for objektiv saksbehandling og vektlagt å overføre kunnskap om bruk av lavvannsindekser i generell saksbehandling. Rapporten oppsummerer arbeidet i prosjektet som er utført ved NVE og Institutt for geofag ved Universitetet i Oslo.

Oslo, oktober 2005


Haavard Østhagen
leder styringsgruppe


John Brittain
programleder

Sammendrag

Informasjon om lavvannsegenskaper i et nedbørfelt er aktuelt i vannbruksplanlegging blant annet når det gjelder dimensjonering og drift av magasiner, forurensing, økologi, jordbruksvanning, estetikk og økonomi. Typiske lave vannføringer kan karakteriseres ved hjelp av såkalte lavvannsindekser eller lavvannskaraktistika. For å beregne lavvannsindekser trengs ideelt sett uregulerte data for en 20-30 års periode. Dersom data helt mangler eller bare finnes i liten grad, er det nødvendig med estimeringsmetoder. Prosjektet "Regional metodikk for estimering av lavvannføring" har satt fokus på lavvann. FoU arbeidet som oppsummeres i det følgende, har foregått i ulike delprosjekter:

- Regresjonssammenhenger v/ Thomas Væringstad (NVE), Hege Hisdal (NVE og UiO) og Turid-Anne Drageset (NVE)
- Begrepsmessige modeller v/ Thomas Skaugen (NVE)
- Regional lavvanns- og tørkefrekvensanalyse (Hovedfagsoppgave) v/ Frode Randen (UiO), veiledere: Lena M. Tallaksen (UiO) og Hege Hisdal (NVE og UiO)
- Endringer i hydrologiske regimer ved inngrep i uregulerte vassdrag v/ Marit Astrup (NVE) og Zelalem Mengistu (NVE)

I tillegg til at resultatene er publisert i ulike tidsskrifter og rapporter, er de også presentert ved internasjonale konferanser samt i egne seminarer både for NVE-ansatte og andre som arbeider med lavvannsproblematikk.

Regresjonssammenhenger

Alminnelig lavvannføring er en lavvannsindeks som står sentralt i forbindelse med konsesjonsbehandlingen ved inngrep i vassdrag. Blant annet legger Vannressursloven denne indeksen til grunn som et av kriteriene for å fastslå om et tiltak i et vassdrag skal konsesjonsbehandles eller ikke. Av den grunn er det fra et hydrologisk synspunkt behov for å vurdere hvor egnet denne indeksen er for å karakterisere små vannføringer. Alminnelig lavvannføring er derfor sammenlignet med andre lavvannsindekser, og noen fordeler og ulemper ved indeksene er belyst (Væringstad og Hisdal, 2005). Bruken av denne indeksen har lange tradisjoner og er godt innarbeidet både i den norske lovteksten og det hydrologiske fagmiljøet. Imidlertid er alminnelig lavvannføring en særnorsk indeks med en komplisert definisjon. En stor ulempe er at selve definisjonen innebærer at indeksen ikke lar seg beregne for ulike sesonger. Dette er spesielt viktig å være klar over dersom alminnelig lavvannføring benyttes som utgangspunkt for å bestemme minstevannføringen i et vassdrag. Mange norske vassdrag har stor forskjell i lavvannføringer om sommeren og vinteren. I et typisk brevassdrag eller innlandsvassdrag, vil de minste vannføringene alltid inntreffe om vinteren, mens sommervannføringene vil være større, ofte vesentlig større. Alminnelig lavvannføring vil i slike vassdrag være en typisk lav vinterverdi, men en ualminnelig lav sommer-

verdi. Det anbefales derfor i stedet å benytte indekser som kan beregnes for sesonger, for eksempel en persentil fra varighetskurven. I Norge er 95 persentilen (Q_{95}) foreslått som ett av kriteriene for å definere sterkt modifiserte vannforekomster i EUs rammedirektiv for vann.

For å lette den hydrologiske saksbehandlingen er det behov for objektive metoder og tilrettelegging av programvare som estimerer alminnelig lavvannføring i nedbørfelt uten vannføringsmålinger. Programmet LAVVANN (Krokli, 1988; Skaugen *et al.*, 2002) i NVEs START-system er utviklet til dette formålet. Programmet estimerer alminnelig lavvannføring via andre lavvannsindekser som funksjon av klima og feltparametre, såkalt regional regresjon. I dette prosjektet er forbedringspotensialet for LAVVANN vurdert ved å bestemme nye regresjonslikninger. Regional regresjon er sammenlignet med estimerer basert på 10% av middelvannføringen og bruk av et representativt nabofelt med målinger. Estimaterne er vurdert ved bruk av uavhengige valideringsstasjoner. Resultatene viser at å benytte 10% av middelvannføring kan gi svært store feil, og anbefales ikke brukt. Representative stasjoner og regresjon gir omtrent like gode resultater. Fordelen med regional regresjon er at metoden er rask og objektiv, dvs. at estimatet blir det samme uavhengig av hvem som gjennomfører beregningen. De nye regresjonslikningene utviklet i prosjektet, er forventningsrette og gir noe bedre resultat enn de opprinnelige likningene i LAVVANN.

En mer detaljert beskrivelse av løsmasser og bedre kvalitet på lavvannsmålinger er viktig for å kunne forbedre estimatene av alminnelig lavvannføring ytterligere. Flere målinger av små vannføringer bør derfor prioriteres. Det bør også bemerkes at usikkerheten til estimatene av lavvannsindekser i umålte felt vil reduseres betraktelig dersom det gjøres enkelte målinger av vannstand/vannføring i lavvannsperioder.

Resultatene fra denne delen av prosjektet er presentert ved ulike internasjonale konferanser bl.a. Nordic Hydrological Conference i Estland, 2004 (Væringstad *et al.*, 2004 – Vedlegg 1) og IAHS (International Association of Hydrological Sciences) VIIth Scientific Assembly i Brasil, 2005. Dessuten er det utgitt en egen rapport i Miljøbasert vannføring-serien (Væringstad og Hisdal, 2005).

Begrepsmessige modeller

I prosjektet har det også inngått en mer grunnforskningsorientert del hvor potensialet for en forbedring av lavvannsestimater via en nedbør-avløp modell er studert. Det er undersøkt hvorvidt det er mulig å estimere responsfunksjonen i en nedbør-avløp modell utelukkende ved bruk av kartdata og opplysninger om middelavrenningen. Den teoretiske sammenhengen mellom innsjøers og nedbørfeltets geometri og vannføringskurven er funnet. Dette er brukt som utgangspunkt for å bestemme responsfunksjonen for bruk i nedbør-avløp modeller. Metoden er testet ut for ulike nedbørfelt og resultatene er lovende. Prosjektet vil bli videreført. Arbeidet så langt ble presentert ved British Hydrological Society Symposium i Storbritannia, 2004 (Skaugen, 2004 - Vedlegg 2).

Regional lavvanns- og tørkefrekvensanalyse

Frekvensanalyse brukes for å estimere sannsynligheten for ekstreme hendelser. Dette kan være aktuelt for eksempel i forbindelse med en vurdering av en spesielt tørr sommer eller et spesielt tørt år, eller ved fastsettelse av minstevannføring. I felt uten eller med få observasjoner kan man kompensere for manglende informasjon ved å benytte informasjon fra nærliggende stasjoner, og dermed redusere usikkerheten i estimatene. Dette gjøres ofte for flom (index-flom metoden), men er lite utprøvd for lavvann og tørke. Metoden baserer seg på at man antar at vannføringen ved stasjoner i en homogen region følger samme fordeling med unntak av en såkalt skaleringsfaktor, ofte middelveiden. Man bestemmer parametrene i fordelingen ved å betrakte standardiserte verdier fra alle stasjonene i den homogene regionen. En lavvannsepisode eller en tørke med et visst gjentakintervall for en stasjon uten målinger kan deretter bestemmes ved bruk av den regionale fordelingen og skaleringsfaktoren.

I prosjektet er Telemark, Agder og Rogaland brukt som testområde og metoden er vurdert for ulike lavvann- (årlig 7-døgns og 30-døgnsminimum) og tørkeverdier (varighet og underskuddsvolum under en bestemt vannføring). Resultatene viser at testområdet er mer homogent med hensyn på tørkeverdiene enn lavvannsverdiene. Det er derfor lettere å tilpasse regionale frekvenskurver for tørke. Dette delprosjektet gjennomføres som en hovedfagsoppgave ved Institutt for Geofag ved Universitetet i Oslo (Randen, 2005). Foreløpige resultater ble presentert ved European Geophysical Unions konferanse i Østerrike, 2005 (Vedlegg 3).

Endringer i hydrologiske regimer ved inngrep i uregulerte vassdrag

Redusert vannføring står sentralt i konsesjonsbehandlingen av vassdragsinngrep. Både lovverk og forvaltning legger opp til stor fleksibilitet, der det tas hensyn til ulike brukerinteresser og vassdragets biologiske, økologiske og fysiske mangfold. Fastsettelse av miljøbasert vannføring¹ krever kunnskap om vassdragets naturlige variasjoner i uregulert tilstand (sesongvariasjoner, variasjoner fra år til år, varighet og størrelse på flom- og tørkehendelser). Spesielt viktig er en vurdering av forholdene i lavvannsperioden. Det hydrologiske grunnlaget er avgjørende for de beslutninger som tas, og er derfor av stor betydning når myndighetene fastsetter minstevannføringspålegget.

Målet med denne prosjektdelen har vært å etablere prototypen til en programvare som kan benyttes av saksbehandlere ved fastsettelse av minstevannføring. Prototypen illustrerer brukergrensesnittet og relevante muligheter. Programmet baserer seg på framstilling av hydrogrammer for uregulerte forhold og som et resultat av ulike typer minstevannføringskrav og reguleringer. En kan da vurdere størrelsesordenen på restvannføringen opp mot det naturlige hydrologiske regimet, eventuelt definere minstevannføringen som en funksjon av vassdragets naturlige variasjoner. Programmet vil også gi nyttig hydrologisk informasjon som kan benyttes til andre formål.

¹ Miljøbasert vannføring ("environmental flows") anbefales internasjonalt som et mer tidsriktig begrep sammenlignet med uttrykket "minstevannføring".

Programmet er tenkt som et hjelpemiddel for saksbehandlere som jobber med minstevannføringspålegg slik at pålegget kan sees i sammenheng med de naturlige variasjonene i vassdraget. Programmet må ikke oppfattes som noe selvstendig produkt når minstevannføringen skal fastsettes, og faglige vurderinger av saksbehandler vil fremdeles være det viktigste elementet for at pålegget som fastsettes blir optimalt. Et eksempel på bruk av programmet inkludert en programbeskrivelse er gitt i Vedlegg 4.

Referanser

- Krokli, B. (1988) Analyse av lavvannføringer, NVE Publikasjon nr. V14, Oslo, Norge.
- Randen, F. (2005) Regional low flow and drought frequency analysis. Hovedfagsoppgave ved Institutt for Geofag, Universitetet i Oslo, Norge. (in prep.)
- Skaugen, T. (2004) Estimating rating curves and response functions from basin geometry and flow velocity. *Hydrology: Science & Practice for the 21st Century*. Vol. 1, 2004 British Hydrological Society, UK, 468-474.
- Skaugen, T., Astrup, M., Mengistu, Z., Krokli, B. (2002) Lavvannføring – estimering og konsesjonsgrunnlag. NVE-rapport Miljøbasert vannføring nr. 1-2002, Oslo, Norge.
- Væringstad, T., Hisdal, H. (2005) Estimering av alminnelig lavvannføring i umålte felt. NVE-rapport Miljøbasert vannføring nr. 6-2005, Oslo, Norge.
- Væringstad, T., Hisdal, H., Drageset, T.-A. (2004) Estimation of low flow indices at ungauged sites, case study from Norway. NHP Report No. 48, Vol. 1, XXIII Nordic Hydrological Conference, Tallinn, Estonia, 61-70.

Vedlegg 1

Væringstad, T., Hisdal, H., Drageset, T.-A. (2004) Estimation of low flow indices at ungauged sites, case study from Norway.

Reprint from NHP Report No. 48, Vol. 1, XXIII Nordic Hydrological Conference, Tallinn, Estonia, 61-70.

ESTIMATION OF LOW FLOW INDICES AT UNGAUGED SITES, CASE STUDY FROM NORWAY

Thomas Væringstad¹, Hege Hisdal¹ and Turid-Anne Drageset¹

¹Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Middeltuns gate 29,
P.O. Box 5091 Majorstua, N-0301 Oslo, Norway

ABSTRACT

The Norwegian Water Resources Act stipulates that if there are abstractions in a basin, that changes the flow in a stream or river and residual flow will be less than the 'common low flow', a licence is required. Reliable methods to estimate this index at ungauged catchments are therefore needed. Current practice includes various methods, e.g. 10 % of mean annual runoff, representative catchments and regression equations (established in 1988). The amount of observed streamflow has increased, both in time and space. Further, it is possible to use GIS technology to derive catchment characteristics. These factors are hoped to increase the accuracy in estimates of low flow indices at the ungauged site and new regression equations were estimated for a region in southern Norway. The methods were compared for 11 verification stations. Using 10 % of mean annual runoff yields the most unreliable results. Estimates applying representative catchments are more reliable, but the method is subjective as opposed to regression equations based on catchment characteristics. The new regression equations gave a slightly improved result, but better low flow measurements and information on soils and geology are needed to further increase the accuracy in the estimates.

INTRODUCTION

A major challenge in hydrology is to estimate various hydrological characteristics in catchments where no hydrometric measurements exist. The issue has recently been addressed on a global scale by the International Association of Hydrological Sciences (IAHS), which has announced a decade on 'Prediction of Ungauged Basins' (PUB), including the key aspect of comparison of methods with respect to estimation uncertainty (Littlewood *et al.*, 2003). Also the project 'Flow Regimes from International and Experimental Network Data' (FRIEND), a crosscutting programme component of UNESCO's VI International Hydrological Programme (IHP), has developed and tested methods for regional estimation of low flows at the ungauged site (<http://www.nwl.ac.uk/ih/www/research/mfriend.html>).

The Norwegian Water Resources Act stipulates that if there are abstractions in a basin, that changes the flow in a stream or river and residual flow will be less than the ‘common low flow’² (CLF), a licence is required. This implies a need for estimation of CLF in ungauged basins. In addition, this low flow index is also used as a starting point to decide on how to set instream flow requirements (residual flow) downstream of hydropower reservoirs or abstraction diversions. Due to an increased awareness about the negative environmental impacts of water resource development, a number of water utilities, hydropower companies, consultants and municipalities now have a professional interest in low flows. Current topical water resources issues in Norway include reservoir design and management, the consequences of pollution and the withdrawal of water from rivers for small hydropower plants, fish farming, irrigation and drinking water supply.

Several methods as how to estimate low flow indices at ungauged sites are available, and an overview can be found in Smakthin (2001). In Norway, there are no requirements or standard methods. Subjective methods are frequently applied, for example estimating low flow indices at the ungauged site based on streamflow observations from nearby basins, or simply assuming that the CLF is equal to 10 % of the mean flow. A more objective method is to apply regional regression models, a relationship between dependent low flow indices and independent catchment and climatic variables. Krokli (1988) established regional models for estimation of low flow indices in Norway using data from 172 stations. Since then the amount of observed streamflow has increased, both in time and space. Further, it is possible to use GIS technology to derive catchment characteristics. These factors are hoped to increase the accuracy in estimates of low flow indices at the ungauged site and new regression equations were estimated for a region in southern Norway.

The focus in this paper is a to list the advantages and disadvantages for the various methods applied to estimate CLF in ungauged catchments in Norway and based on this to recommend a procedure for practical applications. The next section describes the data analysed, followed by a section describing the estimation methods compared. Then the results are presented and discussed, before finally, conclusions and recommendations are given.

DATA AND LOW FLOW INDICES

A dataset of 62 gauging stations with daily measurements is available in southern Norway (Fig. 1). The study area coincides with region 4 and 5 including 34 stations in the earlier study by Krokli (1988). The delineation of the studied area is mostly geographic and administrative, and the region is not necessarily homogeneous with respect to climate, geology and soils.

¹ The low flow index ‘common low flow’ is calculated by first removing the 15 smallest values every year in a daily streamflow record, calculating the annual minimum series and then removing one third of the annual minimum flows. The smallest daily annual minimum streamflow in the remaining series is defined as the ‘common low flow’. An overview of low flow indices is given in Hisdal *et al.* (2004).

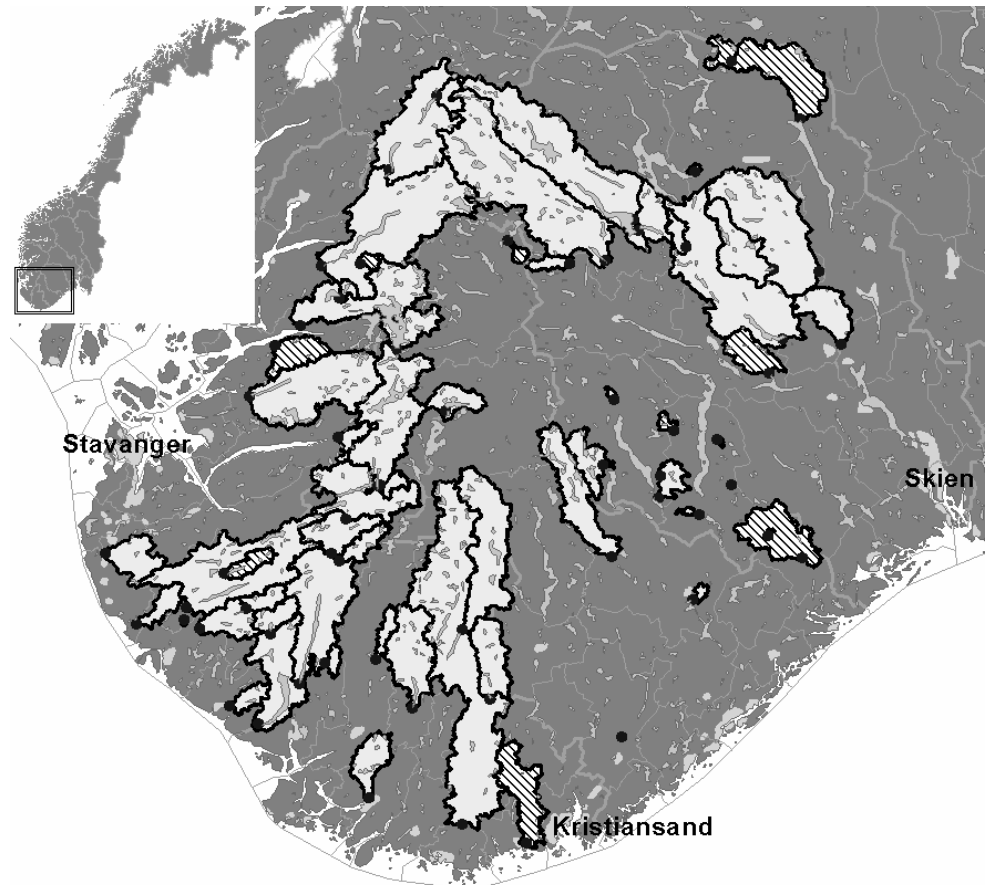


Figure 1. Light grey catchments are used in the multiple regression analysis. Shaded catchments are verification stations.

The stations are split into two subsets:

- 51 stations used to determine independent variables and regression parameters in a multiple regression analysis and
- an independent validation set of 11 stations.

The study area is characterised by high climatic variability. Precipitation is mainly controlled by depressions moving from southwest to northeast. Along the coast the humid air is raised by the mountains (orographic effect) and large amounts of precipitation are released. Around 50-100 km inland the maximum zone of precipitation is found. On the leeward side of the mountains the amount of precipitation is generally small. Climatic stations located in the study area show precipitation based on the normal period 1961-1990 to range from 515 mm/year at Øvre Mår in Telemark to more than 2800 mm/year at Maudal in Rogaland (Førland, 1993). Evaporation is relatively moderate. Potential evapotranspiration varies between 200 mm/year in the mountain areas in the west to 550 mm/year along the coast. The mean annual runoff range from less than $10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ in some inland areas to above $130 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ in the mountains near the southwest coast. The flow regimes are mainly governed by distance from sea and altitude above mean sea level. Coastal and lowland areas usually have low flow in the summer season, while for inland and mountain regions low flow occurs in the winter season.

Physiographic catchment characteristics were objectively and consistently extracted by GIS technology. A list of all the variables is given in table 1. A hydroclimatological variable is introduced through the mean annual runoff (MAR).

Table 1. Catchment characteristics.

Abbrev.	Description
AREA	Catchment area (km ²)
AXIS	Length of catchment axis (km), defined as a straight line from the outlet to the farthest point in the catchment
BOG	Percentage of bog (%)
FOREST	Percentage of forest (%)
HMAX	Highest altitude in the catchment (m a.s.l.)
HMIN	Lowest altitude in the catchment (m a.s.l.)
LAKE	Percentage of lake (%)
MAR	Mean annual runoff (ls ⁻¹ km ⁻²)
MHD	Maximum altitude difference in the catchment (m) (HMAX - HMIN)
MOUNT	Percentage of bare rock (%)
MSL	Main stream length (km)
PAST	Percentage of pasture-land (%)
SL	Slope of main stream (m/km), defined as (maximum altitude difference along MSL)/MSL
SL1085	Slope of main stream between 10 and 85 percent of river stretch (m/km)
SL _{CATCH}	Catchment slope (m/km)
URBAN	Percentage of urbanisation (%)
WIDTH	Catchment width (km) (AREA/AXIS)
WPLAKE	Weighted lake percentage (%), taking the catchment area of lakes into account.

One low flow index is studied, ‘common low flow’¹, (CLF). CLF is an index only used in Norway. It has been shown (Erichsen and Tallaksen, 1995) that this index is highly correlated with the mean annual 1-day minimum flow (MAM(1)) and the 95-percentile (Q₉₅) (flow that is exceeded 95 percent of the period of record). Generally, CLF is smaller than Q₉₅ and larger than MAM(1).

METHODS

We will compare three different methods to estimate the low flow index CLF at ungauged sites. A very simple way is by rule of thumb, to assume that CLF equals 10 percent of mean annual runoff. The latter is taken from the Norwegian runoff map (NVE, 2002) with reference period 1961-1990.

The second method is to use representative gauged catchments and assume similarity between the catchments. The estimated index (in ls⁻¹km⁻²) at the gauged site is assumed to be the same at the ungauged site.

A third alternative is to use a regional regression approach. It is based on the assumption that basins in a hydrologically homogeneous region behave in the same manner regarding low flow response. In other words, basins with similar climate and physical properties will have the same low flow behaviour.

In Krokli (1988) regression equations for estimation of the low flow index mean annual 7-day minimum (MAM(7)) was established for all of Norway. Because of the highly seasonal flow patterns, MAM(7) was estimated for the summer and winter season separately, MAM(7)_s and MAM(7)_w. For the study area the following regression equations were found:

$$MAM(7)_w / MAR = 8.38 * 10^{-2} (WPLAKE + 0.1)^{0.055} * (MOUNT + 0.1)^{0.093} \quad (1)$$

$$MAM(7)_s / MAR = 1.25 * 10^{-3} (WPLAKE + 0.1)^{0.147} * MHD^{0.570} * (WIDTH + 1)^{0.462} \quad (2)$$

For operational purposes estimates of CLF are needed, and Skaugen *et al.* (2002) found the correlation between CLF and min{MAM(7)_s, MAM(7)_w} to be very high. The relationship can be expressed as:

$$CLF = 0.879 * \min\{MAM(7)_s, MAM(7)_w\} + 0.0038 \quad (3)$$

Equations 1-3 are today operationally used as one possible way to estimate CLF in the study area. When comparing methods we refer to this method as Krokli-1988.

RESULTS AND DISCUSSION

A regional regression procedure includes several steps. The first step is to select the low flow index to be estimated. This usually depends on the user requirements and limitations in streamflow data. In our case CLF is the low flow index to be estimated. Step two involves delineation of ‘sufficiently’ hydrologically homogeneous regions. Smakhtin (2001) list several methods for delineation of regions. Summer low flow and winter low flow are generated by different processes. This was reflected by the fact that different prediction variables entered the equations, dependent on if the data set consisted of catchments with summer or winter low flow. In some cases, the same variable seemed to have opposite effect on the two low flow regimes. For example, summer low flow increases with increasing HMAX. But the winter season is longer at high altitudes because precipitation is stored as snow for a longer period. Stream flow is generated by release of water from the groundwater reservoir. To fulfil the requirement of a homogeneous region, the dataset was split into two subsets dependent on the low flow regime. This means that when the regression equations are used, one must decide which low flow regime the site belongs to. The third step deals with finding the relationship between the dependent low flow index and independent catchment and climate variables. This is done by a multiple regression analysis usually including a stepwise regression procedure for selecting the ‘best’ regression model. For the study area, similar regression equations as in equations 1 and 2 have been constructed, but directly on CLF (measured in $ls^{-1}km^{-2}$). This was done by multiple linear regression analysis. Regression models were constructed for both untransformed and log transformed response variable and predictor variables. The untransformed regression equations in some cases gave negative estimates of CLF. This is physical impossible, therefore log transformed data were applied. The latter also gave a slightly better fit. A stepwise regression procedure with automatic selection following Efroymsen’s method (Draper, 1981) was used to

select prediction variables. Regression parameters were estimated by ordinary least squares (OLS) using S-PLUS as a statistical software package.

In the initial phase of choosing variables to be included in the regression equations, some surprising results occurred. Variables such as urban percentage and pasture-land percentage often turned up as significant prediction variables. It is hard to interpret any physical meaning of this and in addition the variables in the data set had a narrow range of variability compared to the other catchment characteristics. In an estimation process for a catchment with a high percentage of either of these two variables, their importance would be overestimated. These two variables were therefore excluded from further analyses as their significances are assumed to be spurious. A few stations had zero or very low flow. This caused a problem when log transformed variables were used because they “became” outliers in the data set. Therefore, these stations were removed when deciding regression parameters for log transformed variables.

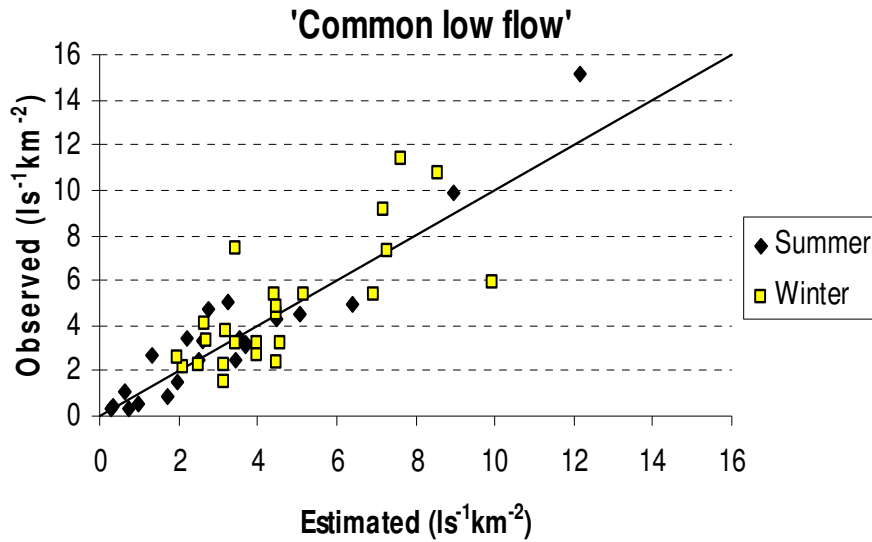


Figure 2. Observed and estimated CLF for the analysis set.

For the study area the following regression equations were found to give the best result.

$$CLF_w = 1.47 * MAR^{0.597} * HMIN^{-0.240} \quad (4)$$

$$CLF_s = 1.45 * MAR^{0.795} * SL^{-0.820} * (BOG + 0.1)^{-0.534} * (MOUNT + 0.1)^{0.199} \quad (5)$$

The observed and estimated values of the catchments included in the analysis are compared in figure 2. The overall fit measured by the Nash-Sutcliffe efficiency criterion (Nash and Sutcliffe, 1970) gave a R^2 of 0.77. Using the regression equation established by Krokli (1988) and Skaugen *et al.* (2002) gave a R^2 of 0.39 for the same stations.

For catchments with a winter low flow regime, MAR and HMIN were selected as prediction variables. MAR is positively correlated with the CLF and high values of MAR indicate high CLF values. HMIN is negatively correlated

with CLF. This means that a station located at a low altitude has higher runoff during a low flow period than a similar catchment located at a higher altitude. A logical explanation of this is that temperature decrease with altitude and snowmelt occurs more often at low altitudes during the winter season. There seems to be fewer catchment characteristics that significantly affect the winter low flow than the summer low flow.

For the sites with summer low flow, four prediction variables were selected. MAR is again positively correlated with CLF. In addition SL, BOG and MOUNT are included in the equation. SL and BOG are negatively correlated and MOUNT is positively correlated. MOUNT is highly correlated with HMAX and snowmelt. The physical understanding of the effect of BOG and SL on CLF remains to interpret.

CLF estimated by the four different methods is compared for the 11 verification stations. Figure 3 shows the observed and estimated CLF at each site. Descriptive statistics on the residuals between the observed and estimated values for are given in table 2. The results and the advantages and disadvantages of each method are further discussed below.

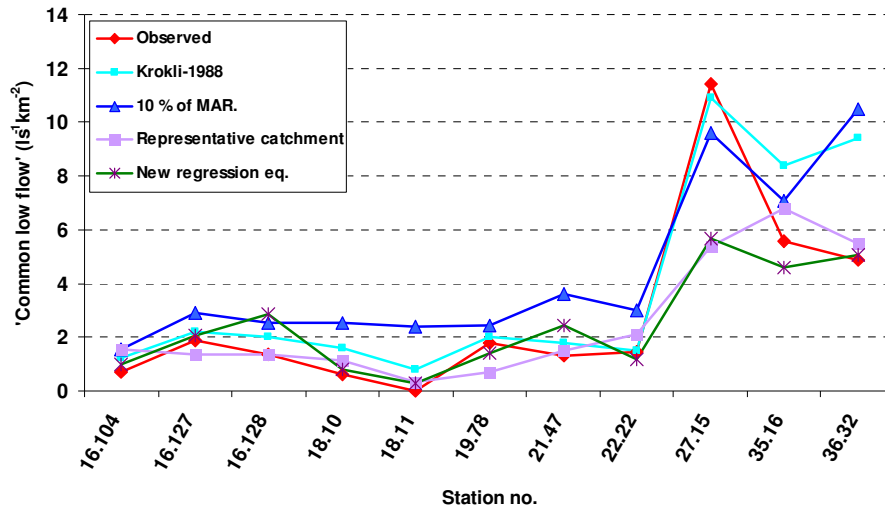


Figure 3. Observed and estimated CLF for the verification stations.

The two regression methods give slightly different results for the verification stations. Krokli-1988 seems to have a small bias in the residuals due to over-estimation. It has the highest R2 value and the smallest residual extreme. The overall result is good, but there seems to be a regional bias inside the study area. The new regression equations have nearly no bias in the residuals. On the other hand, they have a higher variance. The R2 value is a little less than that of Krokli-1988. Also here there seems to be a regional bias present, but it is less obvious. Both methods are easy and fast to use. They have the advantage of being objective and independent of the user. To include geology and soil types as independent variables, the results can probably be improved.

Table 2. Statistics of residuals between observed and estimated CLF for the verification stations.

	Method			
	Krokli-1988	New regression equations	10 percent of MAR	Representative catchment
Mean	-0.99	0.33	-1.56	0.29
Std. dev.	1.43	1.90	1.76	2.00
Max	0.52	5.76	1.82	6.02
Min	-4.52	-1.49	-5.62	-1.21
R2	0.74	0.69	0.53	0.67

Some disadvantages are that a regional bias in the residuals seems to be present in both regression methods and that the regression equations can not estimate CLF in catchments where it equals zero.

The method where CLF is assumed to be 10 percent of MAR is fast and easy to use. In the study area the method generally overestimates CLF and the R^2 value is the lowest of the four methods. Uncertainty in the runoff map of Norway is assumed to be around ± 20 percent and generally higher for small catchments. The method can be used to give a very coarse indication of the CLF value, but it can not be said to give reliable estimates. The disadvantage is that it does not take into account other catchment characteristics than MAR affecting the CLF.

Using representative catchment seems to have no bias in the residuals. The results are similar with that of new regression equations. Good results are found in areas where neighbouring gauged catchments with similar catchment characteristics are available. Data quality is of great importance. Regions with sparse density of gauging stations make it difficult to find representative catchments and the estimation uncertainty increases. The method is subjective regarding the choice of representative catchment. Different persons can get different answers, and who is right or wrong is a subject for debate. Much time is used in the process of finding representative stations and checking data quality.

CONCLUSION

This paper has compared various methods to estimate the low flow index ‘common low flow’ at ungauged sites. Even if using 10% of the mean annual runoff is a simple and fast method, the estimation results are unreliable and the method can not be recommended. Using a representative catchment is a subjective method that depends on long periods of record with high quality data. Finding a representative catchment often is time consuming. The advantage of multiple regression is that this method is fast and objective, and the results are reliable. In general, for practical purposes the latter method is therefore recommended. Using representative catchment can be recommended as an alternative way in cases where the requirements of the method are met.

The new regression equations did not give the expected improvement in the results regarding the verification stations. Of importance to improve estimation of low flow indices at the ungauged site is to improve the measurements.

Catchment physiographic information important for low flow, such as soil and geology indices, is generally not readily available in Norway. This study shows that unless these two requirements are met, low flow estimation at the ungauged site using regional regression can not be expected to significantly improve.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research described in this paper was supported by the “Environmentally-based water flow” project funded by the Ministry of Petroleum and Energy. The authors thank Stian Solvang Johansen at the University of Oslo for his contribution to the regression analysis in the project.

REFERENCES

- Draper, N.R., Smith, H. 1981. *Applied regression analysis*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Førland, E.J. 1993. Precipitation normals, Normal period 1961-1990. Det Norske Meteorologiske Institutt, Rapport nr. 39/93, Oslo, Norway.
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Clausen, B., Peters, E., Gustard, A. 2004. Hydrological drought characteristics. In: *Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Eds. L.M. Tallaksen & H.A.J. Van Lanen. Developments in water science 48, Elsevier Science B. V., the Netherlands.
- Krokli, B. 1988. Analyse av lavvannføringer (Analysis of low flow, in Norwegian with English summary), NVE Publikasjon nr. V14, Oslo, Norway.
- Littlewood, I.G., Croke, B.F.W., Jakeman, A.J., Sivapalan, M. 2003. The role of ‘top-down modelling for prediction in ungauged basins (PUB). *Hydrological Processes* **17**, 1673-1679.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282-290.
- NVE, 2002. Avrenningskart for Norge 1961 – 1990. NVE, Hydrological department, Oslo, Norway.
- Skaugen, T., Astrup, M., Mengistu, Z., Krokli, B. 2002. Lavvannføring – estimering og konsesjonsgrunnlag. (in Norwegian) NVE Rapport Miljøbasert vannføring nr. 1-2002, Oslo, Norway.
- Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, **240**, 147-186.
- Tollan, A. 1977. *Vann – en naturressurs* (Water – a natural resource, in Norwegian). Universitetsforlaget, Norway.

Vedlegg 2

Skaugen, T. (2004) Estimating rating curves and response functions from basin geometry and flow velocity.

Reprint from Hydrology: Science & Practice for the 21 st Century. Vol. 1, British Hydrological Society, 2004, 468-474.

Estimating rating curves and response functions from basin geometry and flow velocity

Thomas Skaugen^{1, 2}

¹Norwegian Water Resource and Energy Directorate; ²University of Oslo, Norway

INTRODUCTION

This study was initiated by a need to quantify the dampening effects of lakes on flood peaks for lakes where no established rating curve existed, due to lack of measurements. This is a common class of problem and clearly a motivation for the PUB (Predictions in Ungauged Basins) initiative launched by the International Association of Hydrological Sciences (IAHS, 2002). The only information at hand was that which could be obtained from maps and information on mean annual discharge (MAD). A suitable point of departure for the study was to investigate the physical significance of the parameters of function describing water level-discharge relationships, termed the rating curve,

$$Q = ah^n \quad (1)$$

where Q is discharge [$m^3 s^{-1}$], h is the depth of the outlet (water level) [m] and a and n are empirical constants. Theoretical expressions for the discharge from weirs of different shape give the discharge as constants multiplied with the water depth raised to an exponent determined by the shape of the weir (French, 1994; Grip, 1972). It is plausible that a similar reasoning for n can be applied to for the rating curve for lakes and natural channels, which leaves a in Equation 1 as a scale constant taking into account the size of the drainage basin upstream and local climatic forcing like, for example, the mean annual precipitation.

If one could estimate the parameters a and n in Equation 1 with data derived from maps and MAD, the possibilities for advances in problems related to PUB would greatly improve. Furthermore, one could also think of Equation 1 as a response function suitable for describing the dynamical behaviour of discharge in a rainfall-runoff model. The popular Swedish rainfall-runoff model, HBV (Bergström, 1995), mimics the observed nonlinearity of discharge response by using a collection of linear reservoirs to describe the dynamics of discharge. Experiences from using the model in operational flood forecasting in Norway have raised the question whether

the model is capable of reproducing the appropriate discharge dynamics for various catchment scales and various sources and intensities of input (snowmelt, rain). A typical notion is that the model simulates well for a certain average sized basin and input of average intensity, but has errors for high and low intensity input, especially for small basins. Also, the current response function in the HBV model was found to give rise to some concern when the model became the standard tool for spillway design flood studies of the hydropower system in Sweden (Lindström *et al.*, 1997, Bergström *et al.*, 1992).

If suitable response functions of type Equation 1 can be determined, the desired nonlinearity of the response function can be obtained as well as being estimated independently of the discharge data, which is also interesting in respect of the problem of over-parameterisation in rainfall-runoff models.

DEVELOPING RATING CURVES FOR LAKES

We are interested in estimating the parameters a and n of the general expression for a rating curve from the outlet of a lake, given as Equation 1. Through the relation

$$Q = vA \quad (2)$$

we can derive an expression for the area A of the outlet by using the Chezy equation for the average velocity of uniform turbulent flow in a natural channel (see Dingman, 1984, p113).

$$v = C \cdot R^{1/2} S^{1/2} \quad (3)$$

where Chezy's C expresses the inverse of the resistance of the channel to the flow, R is the hydraulic radius, $R = A / P$, where P is the wetted perimeter of the cross section, and A is the area of the cross section. S is the slope of the channel bed. For channels where the width, B , is significantly larger than the depth h , R can be approximated by the depth h , $R = h$. A rule of the thumb is that R can be approximated by the depth h if $B / h > 15$ (Dingman 1984, p. 87; Sæterbø *et al.*, 1998, p.

77).

To estimate the coefficient C , we make use of its relation with the commonly known Manning's roughness coefficient m , as described in Dingman (1984, p. 139):

$$C = \frac{R^{1/6}}{m} \approx \frac{h^{1/6}}{m} \quad (4)$$

When R is approximated by h , we get the following simplified Chezy equation for the velocity of uniform turbulent flow as a simple function of h :

$$v = \frac{1}{m} \cdot h^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

where m can be estimated from an assessment of the physiographic conditions of the outlet (Dingman, 1984, p.143). The area of the outlet A can then be estimated as:

$$A(h) = \frac{Q}{v} = \frac{ah^n}{\frac{1}{m}h^{2/3}S^{0.5}} = mah^{n-2/3}S^{-0.5} \quad (6)$$

We can further get an estimate of width B of the outlet as a function of the depth h . We know that A in Equation 6 is the integral of the function $B(h^*)$ integrated from $0 < h^* < h$. We differentiate Equation 6 with respect to the depth h to obtain B for a given depth h :

$$B(h) = maS^{-0.5}(n-2/3)h^{n-5/3} \quad (7)$$

By solving for a in Equation 7, and substituting for a in Equation 6, the area is:

$$A = \frac{Bh}{n-2/3} \quad (8)$$

from which we can derive an estimate for n as:

$$n = \frac{Bh}{A} + 2/3 \quad (9)$$

It can be noted here that if we had used a velocity expression containing the square root of the water level h , i.e. $v = \text{Const.} \cdot \sqrt{h}$ (i.e like that of Torricelli $v = \sqrt{2gh}$), we would obtain rating curves, or discharge equations, with an exponent equal to those theoretically obtained by using the energy principle (neglecting the frictional losses) for weirs of different shapes such as rectangular, parabolic, triangular, etc. (French, 1994, p. 339).

Consider Figure 1 and assume that the shape of a part of a lake/basin near the outlet can be described by the same type of functions as for the shape of the outlet, Equations 6 and 7, respectively:

$$A(H) = c_1 H^{N-2/3} \quad (10)$$

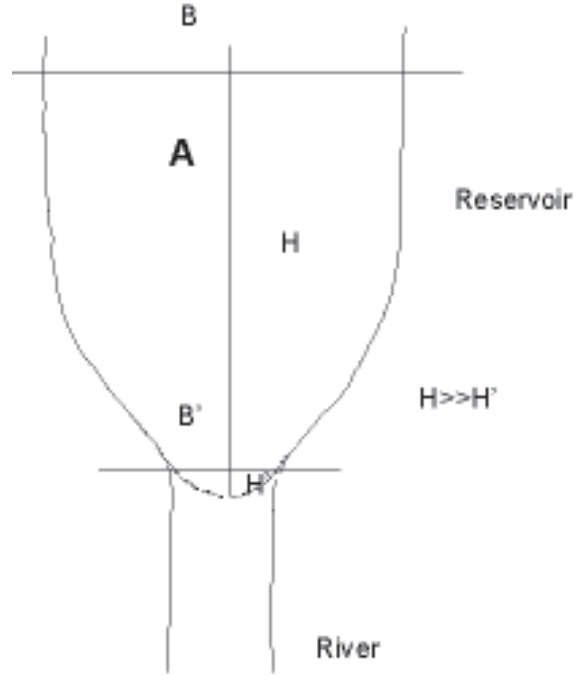


Fig. 1 Shape of a reservoir parameterised near the outlet. The dashed curve indicates an imaginary shape.

and

$$B(H) = c_1(N-2/3)H^{N-5/3} \quad (11)$$

where c_1 and N are constants, H is the length of the considered part of the reservoir, B is the width of the reservoir at length H , A is the area of the reservoir constrained by B and H and N is determined from Equation 9, using H instead of h .

Let B' determine the width of the channel at the point of observation, i.e. where we choose to establish the rating curve. The width B' , is associated with a specific water level h' according to Equation 7. B' can also be calculated using (11) for some specific length H' . The expressions 7 and 11 are thus equal. Let us assume that n and N in Equations 7 and 11 are constant for different water levels but not necessarily equal. A constant N implies that the shape of the reservoir, in terms of Equation 9 is constant. If we introduce another constraint and assume that h and H are linearly related ($H = c_2 h$, where c_2 is again a constant), Equation 11 can, for our point of measurement, be written as:

$$B' = c_1 c_2^{N-5/3} (N-2/3) h'^{N-5/3} \quad (12)$$

The terms in Equation 12 preceding $c_1 c_2^{N-5/3} (N-2/3)$, are just constants and necessarily equal to the constants in Equation 7 (which is easily seen by setting $h' = 1.0$ in Equations 7 and 12). Thus, Equations 7 and 11 can only be equal if n and N are equal. To summarise, we have that, under

the assumptions of a constant shape of the reservoir for different water levels, and also that h and H are linearly related, the coefficient n of the rating curve can be determined from measuring the shape of a lake, i.e from a map.

To determine the unknown, a , of Equation 1, we have to introduce additional information. Let us assume that the mean annual discharge (MAD) represents a water level h' of the lake at which we have measured our parameters for the shape of the lake, A , B , B' and H . From Equation 1, we have :

$$\bar{Q} = ah'^n \quad (13)$$

where $\bar{Q}$ is the MAD. If we solve Equation 13 for a and insert into Equation 7, we get:

$$B' = m\bar{Q}h'^{-n} S^{-0.5} (n - 2/3)h'^{n-5/3}$$

which gives the water level h' for the MAD as:

$$h'^{n-5/3} = \frac{B'S^{0.5}}{m\bar{Q}(n - 2/3)}$$

which gives:

$$h' = \exp \left[\frac{\ln \left(\frac{B'S^{0.5}}{m\bar{Q}(n - 2/3)} \right)}{-5/3} \right] \quad (14)$$

When the specific h' associated with the MAD is determined, a is determined from Equation 13 as:

$$a = \frac{\bar{Q}}{h'^n} \quad (15)$$

and a rating curve is thus established from information obtained from maps and knowledge of the mean annual discharge.

Case study for lakes

The methodology for the derivation of the coefficients for the rating curve for lakes was tested for six lakes in Norway. The derived rating curves were compared to those obtained traditionally by measurements. The manning number m , can be estimated in the following manner (Dingman, 1984, p 143) as $m = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)m_0$, where m_0 describes the degree of meandering, m_1 describes the material involved, m_2 describes the irregularity, m_3 describes the variations of channel cross section, m_4 describes the relative effects of obstructions and m_5 describes the effects of vegetation. However, for these case studies, m was estimated from streamflow measurements with known hydraulic radius, slope and average velocity. The roughness coefficient, m is then estimated from Equation 5 as $m = R^{2/3}S^{0.5}/v$. The slope S was estimated as 0.001 for all the lakes after interviewing the engineers in charge of the measurements and A , B , H and B' was estimated using a Geographical Information System (GIS). The mean annual discharge was estimated from measurements. Table 1 shows the necessary input data, together with the derived coefficients n and a .

Table 1. Input data necessary to estimate n and a . A comparison can be made between “observed” coefficients derived from streamflow measurements and coefficients estimated by the proposed methodology (see also Figure 3).

Measured data	Skogsfjordvatn	Hølvatn	Øvstevatn	Atnasjø	Narsjø	Øvrevatn
Area (A) [m ²]	22445	1720	1173	5137	1178	4265
Width (B) [m]	260.3	56.2	59.4	44.1	61.8	149.9
Length (L) [m]	180	69.1	28.2	123.9	31.04	47.9
Width (B') [m]	64.2	9.8	19.4	38.7	15.8	60.0
MAD	7.98	1.27	1.18	10.2	2.22	24.3
Manning (m)	0.07	0.03	0.055	0.058	0.07	0.04
Slope (S)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
<i>Estimated parameters</i>						
n	2.75	2.92	2.10	1.73	2.29	2.35
a	19.92	11.34	12.68	20.34	5.66	29.9
<i>Estimated from streamflow measurements</i>						
n	2.24	2.92	1.21	1.51	2.07	2.45
a	20.83	10.5	18.75	47.7	8.99	29.9

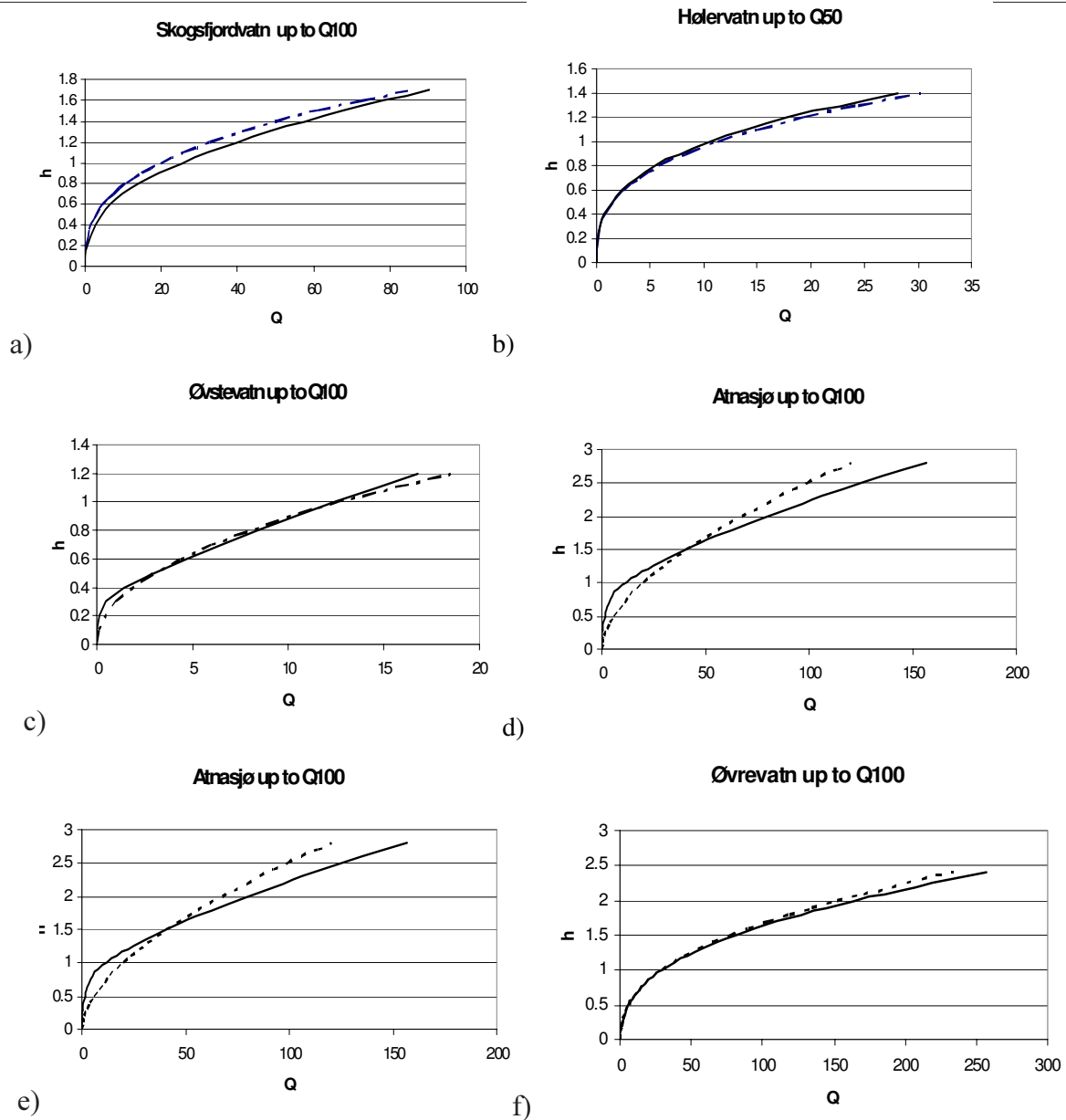


Fig. 2 Estimated (dashed line) and observed (solid line) rating curves for lakes in Norway. The rating curves are valid up to the 100 years flood (50 year flood for b)).

Figure 2 shows the rating curves derived from measurements of the streamflow (termed ‘measured’ in the figure) and estimated by the proposed methodology. A comparison between the coefficients of the rating curve determined from streamflow measurements and by the proposed methodology can be found in Figure 3. The rating curves derived from the presented method are in good agreement with those of the observed, with an exception for Figure 2(d), Atnasjø. The measured rating curve for Atnasjø consists of two segments, one valid for 0–0.8 metres, and from 0.8 metres and higher. These two segments define two different channel profiles,

which, of course, constitutes a violation of the assumption that the shape of the lake in terms of n , should be constant.

DEVELOPING RESPONSE FUNCTIONS FOR USE IN RAINFALL-RUNOFF MODELS

The framework presented in the previous section describes how the rating curve can be obtained from geometrical assessments of the area near the outlet together with an expression for the average velocity of uniform turbulent flow. For developing a response function for a rainfall-runoff model,

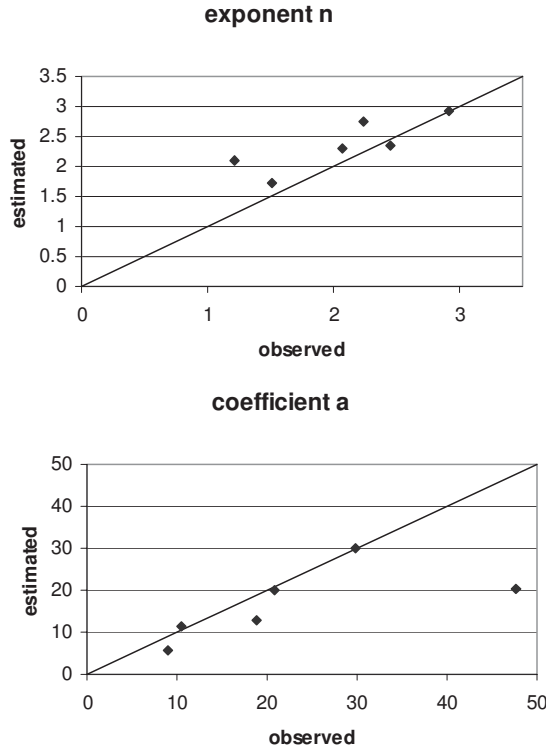


Fig. 3 Comparison of observed and measured coefficients n and a of the rating curve. The diagonal line indicates perfect match.

the same reasoning is applied. We can imagine that the lake is filled with characteristic soil material for whatever area we are interested in, and proceed with the procedure presented in the previous section.

The response function controls the dynamics of the generated runoff in a rainfall-runoff model. Traditionally, the response function (at least in the HBV model) is derived from the linear reservoir theory. In Lindström *et al.* (1997) a nonlinear response function identical to the type of a rating curve that was investigated for possible improvements on the dynamics of the HBV model. The investigation showed improvements in runoff dynamics compared to the traditional combination of linear approaches. Thus, an expression for the rating curve of type Equation 1 can be used as a response function. Using Equations 1 and 2, together with the Darcy equation for saturated flow:

$$v = kh \quad (16)$$

which relates the groundwater flux or velocity $v [m s^{-1}]$, to the average gradient of the groundwater table in the basin, h and the hydraulic conductivity, k , we get an expression for the area of the outlet of the basin as:

$$A(h) = \frac{Q}{v} = \frac{ah^n}{kh} = k^{-1}ah^{n-1} \quad (17)$$

We can proceed in the same manner as in the previous section and obtain an expression for the width B of the outlet as:

$$B(h) = \frac{a}{k}(n-1)h^{n-2} \quad (18)$$

By solving for a in Equation 18, and substituting for a in Equation 17, the area becomes:

$$A = \frac{Bh}{n-1} \quad (19)$$

from which we estimate n as:

$$n = \frac{Bh}{A} + 1 \quad (20)$$

Consider again Figure 1 and let us say that the shape of a part of a basin near the outlet can be described by the same type of functions as for the shape of the outlet, Equations 17 and 18:

$$A(H) = c_1 H^{N-1} \quad (21)$$

and

$$B(H) = c_1 (N-1)H^{N-2} \quad (22)$$

where c_1 is a constant, H is the length of the considered part of the basin, B is the width of the basin at length H , A is the area of the basin determined by B and H and n is determined from (20), using H instead of h . By applying the same reasoning and assumptions as in the previous section, we find that N in Equations 21 and 22 is equal to n in Equation 20 if the shape of the basin (i.e. the groundwater aquifer) is constant in terms of a constant n , for different water levels, and if H and h are linearly related.

To determine the unknown, a of Equation 1, we assume that the mean annual discharge (MAD) represents a ground water gradient h' of the basin at which we have measured our parameters for the shape of the lake, A , B , B' and H . From Equation 1, we have:

$$\bar{Q} = ah^m \quad (23)$$

where $\bar{Q}$ is the MAD. If we solve Equation 23 for a and insert into the expression for the width of the measuring point B' , Equation 18, we get the groundwater level h' for the MAD as:

$$h'^{-2} = \frac{kB'}{\bar{Q}(n-1)}$$

which gives:

$$h' = \exp \left[\frac{\ln \left(\frac{kB'}{\bar{Q}(n-1)} \right)}{-2} \right] \quad (24)$$

When the specific h' associated with the MAD is determined, a is determined from Equation 23 as:

$$a = \frac{\bar{Q}}{h^n} \quad (25)$$

and a response function is thus established from information obtained from maps and knowledge of the mean annual discharge.

Case study of response function

A rainfall-runoff model was constructed to test the new response function. The model, which at the present state of development does not merit a name, is a lumped model and 'borrows' the soil water routine features from the Swedish HBV model. The snow routine consists of a distribution model described in Skaugen *et al.* (in press, 2004) and a degree-day melting routine. The dynamics of discharge of the model are represented by the response function derived according to the methodology presented in this section. For this very preliminary study, only one basin, Narsjø, was tested with the new model. Figure 4 shows the principles of the model. The average (basin wise) groundwater gradient h_i is, for each time step, calculated as h_{i-1} from previous time step plus precipitation and/or snowmelt multiplied with effective porosity minus the loss in gradient due to discharge of the previous timestep.

We estimated the parameters of the response function from data for the basin Narsjø, where the rating curve for Narsjø lake was estimated successfully (see Figure 2 e). The following

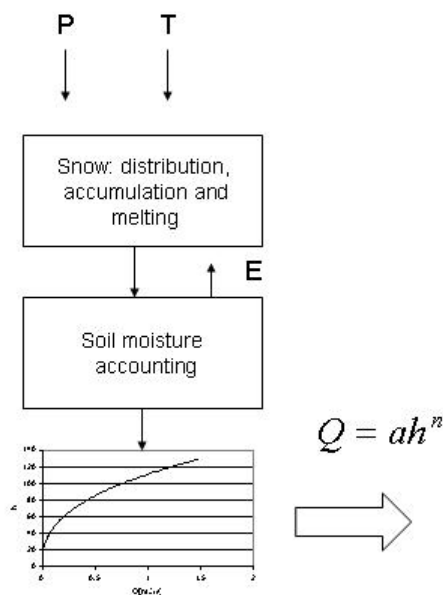


Fig. 4 Schematic illustration of the rainfall-runoff model

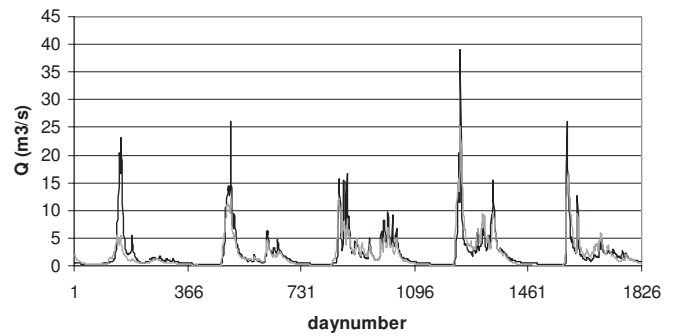


Fig. 5 Performance of the rainfall-runoff model for the calibration period (five years). Black line is observed discharge and grey line is simulated discharge. The first year is badly simulated because only snow accumulated in the current year was accounted for.

information for basin Narsjø was obtained from a map using a GIS: Area (A): 200000 m², width (B) (largest): 7000.0 m, width (B') at outlet river: 15.83 m and the length from outlet (B') to B, H : 31.0 m. By (20) this gives us an exponent, $n = 2.085$. With knowledge of the $MAD = 2.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, the rest of the necessary parameters were calibrated using the automatic calibration procedure PEST (Brebber *et al.*, 1994). For the five years of data available, the model performed according to a Nash-Sutcliffe criterion R^2 , of $R^2 = 0.79$ which is close to the operational HBV model ($R^2 = 0.84$) used in the national flood forecasting service. Figure 5 shows the calibrated performance of the model.

It is interesting to note that the optimal spatially averaged values of the parameters hydraulic conductivity k , and effective porosity were 0.0004 m s^{-1} and 0.0013 respectively, which appear to be sensible compared to measured values found in the literature. Although the low flow periods and the flood peaks are underestimated, the exercise shows that methodology presented here for estimating response curves can be used. The model is, at present, only in its infancy of development and needs testing for more basins and for PUB problems.

CONCLUSIONS

By assessing lake and basin geometry and using expressions for flow velocity, rating curves for lakes and response functions for use in rainfall runoff models are developed. The methodology is especially suited for PUB-related problems in that basic information can be extracted from maps and an estimate of the mean annual discharge. Further development of the rainfall runoff model can, for example, include a relationship between hydraulic conductivity and the groundwater gradient h_i as described in Beven (1984). The principle of the rainfall runoff model presented, letting the shape of the basin determine the runoff dynamics, is somewhat

contrary to the prevailing distributed approach in hydrological modelling. The principle is also inspired by a notion that distributed modelling can be an obstacle for the development of a better understanding of the processes involved, in that a poor distributed model may give better results than the lumped version of the poor model although no scientific advances are made. This weakens the motivation for better understanding and modelling of the physical properties of rainfall-runoff relationships.

REFERENCES

- Bergström, S. 1995. The HBV model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, V.P. Singh (ed.). Water Resources Publications, Highlands Ranch, 443–476.
- Beven, K. 1984. Infiltration into a class of vertically non-uniform soils. *Hydrol. Sci. J.*, **29**, 425–434.
- Bergström, S., Harlin, J. and Lindström, G. 1992. Spillway design floods in Sweden: I. New guidelines. *Hydrol. Sci. J.*, **37**, 505–519.
- Brebbler, L., Doherty, J. and Whyte, P. 1994. *PEST - Model Independent Parameter Estimation*. Watermark Computing, Corinda - Australia.
- Dingman, S.L. 1984. *Fluvial Hydrology*. W.H. Freeman and Company, New York.
- French, R.H. 1994. *Open-channel hydraulics*. International editions. Mc Graw-Hill, Inc, New York. 739pp.
- Grip, H. 1972. Innført feil ved forenklet utvarderingar av pegeldiagram. *Proc. Nordic Hydrological Conference*, Sandefjord, 6-8 sept (in Swedish).
- IAHS, International Association of Hydrological Sciences. 2002. *Newsletter no. 75*.
- Sæterbø, E. Syvertsen, L. and Tesaker, E. (eds.) 1998. *Vassdragshåndboka*, Tapir, Trondheim (in Norwegian).
- Lindström, G., Johannson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S. 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J. Hydrol.*, **201**, 272–288.
- Skaugen, T., Alfnes, E., Langsholt, E.G. and Udnæs, H-C. 2004. Time variant snow distribution for use in hydrological models. *Ann. Glaciol.*, in press.

Vedlegg 3

Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Randen, F. (2005) Regional low flow and drought frequency analyses.

Abstract of presentation given at: European Geosciences Union, General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24 – 29 April 2005.



Regional low flow and drought frequency analysis

Hege Hisdal (1 & 2), Lena M. Tallaksen (1) and Frode Randen (1)

(1) University of Oslo, Department of Geosciences, (2) Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Hydrology Department

An assessment of extreme hydrological low flow and drought events is of vital importance to water resources management. One way to reduce the uncertainty in the estimate of the extreme events and their return periods is to use a regional data set with observations from several sites. Hence, uncertainty reduction by introducing more data can be viewed as space substituting time to compensate for short records. This procedure is commonly applied for floods, and is therefore often referred to as the 'index-flood' method. The index-method is also applicable to drought, but few examples exist. In this study the index method is applied for various low flow and drought characteristics. Annual minimum 7-day and 30-day series as well as annual drought deficit duration and volume are analysed. The study region in southern Norway includes 67 series with a record length between 20 and 100 years. For some stations the low flow period is in the summer season as a result of low precipitation and high evaporation losses. Most of the stations have, however, winter low flow caused by precipitation being stored as snow and ice, and a distinction between the summer and winter low flow events has to be made. L-moments are used to test the regional homogeneity and for determination of a regional distribution. Homogeneous regions are defined based on a split sample regionalisation procedure, and the variability measure used for grouping of the series obtained as a function of catchment characteristics. The latter enables ungauged sites to be assigned to a region. The results are presented and discussed with respect to the specific low flow or drought characteristic under study.

Vedlegg 4

Astrup, M. (2002) Eksempel og programbeskrivelse MILJØVF delprosjekt 2: Endringer i hydrologiske regimer ved inngrep i uregulerte vassdrag.

Eksempel og programbeskrivelse MILJØVF

delprosjekt: Endringer i hydrologiske regimer ved inngrep i uregulerte vassdrag

Eksempel på bruk av programmet

Det er gitt konsesjon til regulering av "Storbekken" i Arendalsvassdraget, og det skal fastsettes et minstevannføringspålegg nedstrøms dammen til "Bekken" kraftverk. Det er ingen hydrologiske målestasjoner i Storbekken, og det er derfor behov for en representativ stasjon som beskriver forholdene.

Kartet i modul 1 (Figur 1) viser en oversikt over alle målestasjonene det er tilrettelagt data for. I regionen rundt Storelva er det 6 stasjoner å velge mellom, men kun tre av disse anses som representative i forhold til beliggenhet. Ved å klikke på de ulike stasjonene kommer en liste med feltkarakteristika opp. Siden man ønsker en representativ stasjon på lavvannsverdier vektlegges parametrene effektiv sjøprosent, areal og klimatisk påvirkning/høydeforhold. Saksbehandleren velger stasjonen 19.73 Kilåi Bru. Denne ligger til grunn for all videre analyse.

Brukeren ønsker så å ta en titt på data for denne stasjonen for å gjøre seg kjent med de hydrologiske forholdene i vassdraget. I modul 2 'Plotte vannføringsdata' kan man velge mellom plott av hele dataserien eller plott av et og et enkelt år. Plottene presenteres med valgfri oppløsning (døgn – uke – måned – år). Eksempler er vist i Figur 2 – Figur 5. I tillegg kan flerårsmiddelet i observasjonsperioden plottes.

Videre ønsker brukeren å velge ut tre typiske år som karakteriserer hhv tørre, normale og våte forhold. Brukeren vet at 1996 var et veldig tørt år i området med blant annet vannforsyningsproblemer. Ved å plotte hele observasjonsperioden med oppløsning år får han bekreftet at middelvannføring dette året var veldig lavt. Ved å plotte 1996 med månedsoppløsning ser brukeren at vannføringen i sommermånedene juni-august er lav. Brukeren ber programmet "huske" at 1996 skal være et tørt år. For å jevne ut variasjonene i dataserien velger brukeren oppløsning på månedsnivå. For å karakterisere et middels og tørt år brukes søkemuligheten i programmet. Brukeren ber programmet finne median året (1998) og det året med høyeste årsmiddelvannføring (1990), og ber programmet "huske" disse som hhv. middels og vått år. Deretter plottes hydrogrammene for disse tre årene i et eget plottevindu (Figur 6). Plottet viser tydelig av det tørre året skiller seg fra det normale og våte året med lav vannføring midtvinters og i sommersesongen. Vannføringen gjennom våren og høsten derimot tilsvarer forholdene i et normalår.

For kunne fastsette minstevannføringspålegget ønsker brukeren å beregne noen hydrologiske lavvannsindekser. Dette gjøres i modul 3 'Beregne hydrologiske indekser'. Programmet har beregnet flere lavvannsindekser ved siden av noen middelvannføringer og noen flomverdier. Brukeren anser alminnelig lavvannføring og 75-persentilen som relevante størrelser når pålegget skal fastsettes og ber programmet plotte disse verdiene

sammen med hydrogrammene for vått, middels og tørt år. Plottet (Figur 7) viser blant annet at 75-persentilen underskrides både i en tre måneders periode om sommeren og en tre måneders periode om vinteren i 1996 som er et tørt år. Alminnelig lavvannføring derimot vil i gjennomsnitt renne i elva selv i et tørt år dersom man ser på måneds-middelet. Plottet viser også at selv i et vått år er det mulighet for at 75-persentilen underskrides i en kortere periode.

Så skal minstevannføringspålegget fastsettes (modul 4.1 'Plott minstevannførings-pålegg'). Etter at konsesjonssøknaden har vært på høring har man kartlagt hvilke brukerinteresser som er skadelidende av reguleringen, og som derfor skal tilgodesees med et minstevannføringspålegg. Storbekken er kjent som gyteplass for flere fiskearter, og det er nødvendig med både en lokkeflom og en viss vannføring i gyteperioden. Området rundt Storbekken er også et mye brukt utfartssted i fellesferien med fossen som hovedattraksjonen. I tillegg skal alminnelig lavvannføring til enhver tid renne i vassdraget. Konsesjonsmyndighetene vurderer det imidlertid slik at det er mer hensiktsmessig å gjøre en sesonginndeling for det generelle minstevannføringskravet, og ønsker å vurdere dette alternativet også. Videre er det enighet om at de ulike brukergruppenes behov for vann (mengde og varighet) kan beskrives slik:

Brukerinteresse	Behov for vann	Tid
Generelt krav om minstevannføring	Alminnelig lavvannføring	Hele året
Generelt krav om minstevannføring	95 persentil sesong	Sommer (apr-sept), Vinter (okt-mar)
Lokkeflom	Middelflom	2 døgn i løpet av mai
Vann til gyting	1 m ³ /s	April og mai
Vann til fossefall i turistsesongen	90-persentil	Juli

Disse opplysningene legges inn i programmet, og brukeren får en oversikt over de ulike brukerinteressene i tabellform (Tabell 1) og på plott (Figur 8). Hvis han ønsker informasjon om hva de ulike lavvannskaraktistika utgjør i m³/s, går han tilbake til modul 3 'Beregne hydrologiske karakteristika'.

Tilslutt ber han programmet plote hydrogrammet for et middels og tørt år sammen med det ønskede pålegget for å se om det er realistisk å opprettholde pålegget i et tørt år (Figur 9). Plottet viser at 95-persentilen i vintersesongen ikke er mulig å opprettholde i det tørre året. Av den grunn kan det være aktuelt å bruke alminnelig lavvannføring som et generelt minstevannføringskrav i stedet for 95-persersentil for hhv. sommer- og vintersesong. Videre viser plottet at kravet om at fossen alltid skal ha vann tilsvarende 90-persentilen i juli kan bety at kraftverket må bruke alt tilsiget denne måneden på å opprettholde pålegget. For et middels år derimot skulle det ikke være noen problemer med å oppretthold minstevannføringskravet som er foreslått.

I konsesjonssøknaden ligger det og et ønske om å overføre noe vann fra nabofeltet til Storbekken. Nedbørfeltet det eventuelt skal overføres vann fra, er et mye brukt rekreasjonsområde, og det er stor lokal motstand mot at kraftverket skal kunne disponere dette vannet. NVE mener imidlertid at et mindre uttak er forsvarlig, og bruker modul 4.2 'Restvannføring etter uttak' til å illustrere dette (Figur 10). Det er søkt om konsesjon til et uttak som tilsvarer 30 % av middelvannføringen og uttaket skal fordeles jevnt over året. For å beskrive en såkalt naturlig tilstand i vassdraget benyttes et flerårsmiddel i observasjonsperioden plottet på døggnivå. Restvannføringen i vassdraget er definert som naturlig vannføring fratrasket uttaket som altså utgjør 30 % av middelvannføringa fordelt jevnt over året. Hydrogrammene for naturlig vannføring, restvannføring og uttak plottes (Figur 11). I tillegg velger brukeren å plote ulike måter å foreta uttaket på samt hydrogrammet for et tørt år (Figur 12-Figur 15). Plottet viser at vannføringen etter uttaket – naturlig nok - er lavere enn om overføringen ikke hadde funnet sted. På den annen side vil stor deler av den naturlige variasjonen fremdeles være til stede ved større vannføringer. De største endringene skjer i perioder med lave vannføringer fordi man risikerer at store deler av vannføringen overføres ut av feltet. Sett i lys av vannføringsvariasjonene i et tørt år (plottet med månedsoppløsning) ser det imidlertid ut til at restvannføringen kun i begrenset grad underskrider lavvannføringen i et tørt år.

Beskrivelse av programmet MILJØVF

Programmet kalles MILJØVF, og består av følgende moduler:

Modul 1. Kart

Kartet viser hvilke målestasjoner det er tilrettelagt data for.

Modul 2. Plotte vannføringsdata

Grafisk framstilling av vannføringsdata ved en utvalgt stasjon. Utvelgelse av et såkalt vått, middels og tørt år som benyttes senere i programmet.

Modul 3. Beregne hydrologiske karakteristika

Beregne ulike lavvannsverdier og andre hydrologiske karakteristika ved en utvalgt stasjon.

Modul 4. Minstevannføring

- 4.1 Grafisk framstilling av minstevannføringspålegget når pålegget er definerte/kjent
- 4.2 Grafisk framstilling av restvannføring etter uttak når uttak/restvannføring er en funksjon av naturlige vannføringsvariasjoner

Modul 1 Kart er programmets inngangsport, der brukeren velger stasjonen som skal ligge til grunn i resten av programmet. De andre modulene kan brukes uavhengig av hverandre, men brukeren bør med fordel definere et vått, et middels og et tørt år i modul 2 'Plott vannføringsdata' for å få mest ut av de andre modulene i programmet.

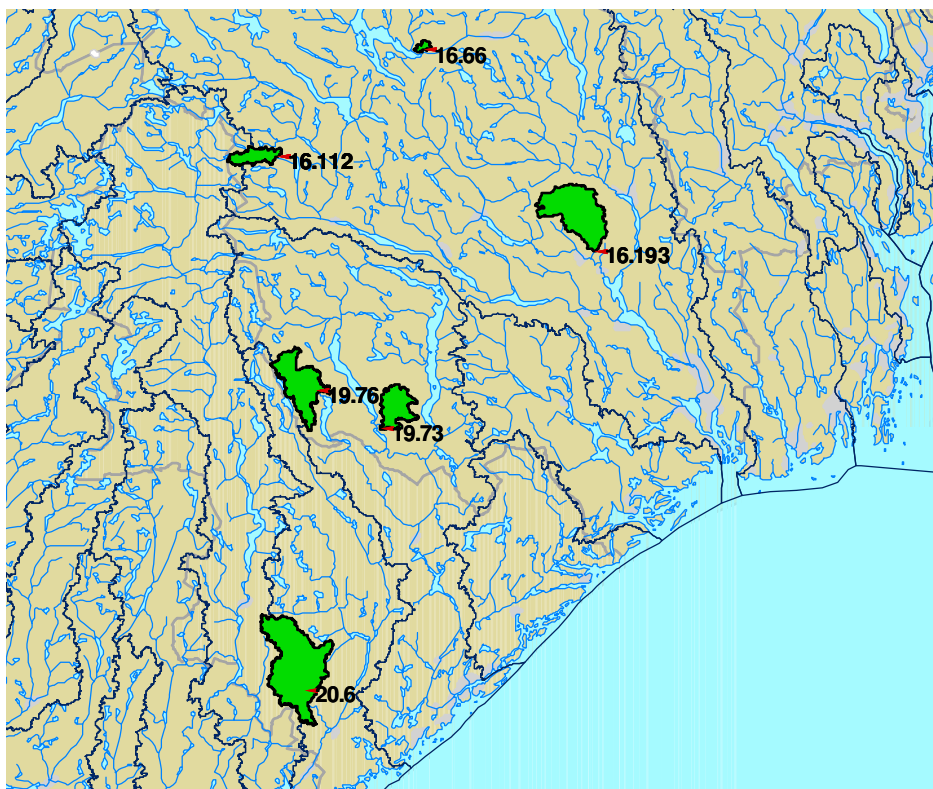
Modul 1 Kart

Inngangsporten til programmet er et norgeskart som viser hvilke målestasjoner det er tilrettelagt data for. Kartet er, sammen med feltkarakteristika, ment som en innledende "analyse" for å finne en representativ stasjon som skal benyttes i resten av programmet.

Kartets funksjon og utforming

Inngangsporten til programmet er et norgeskart som viser hvilke målestasjoner det er tilrettelagt data for. Kartet skal ikke være noen erstatning for verktøy som Kartulf eller NVE-atlas. Kartet må være oversiktlig, og bør kunne zoomes inn/ut. Forslag til kartinformasjon: Elvenettverk (ikke for detaljert), vassdragsområder og region-inndeling for bruk i programmet LAVVANN. I tillegg skal kartet vise hvilke målestasjoner det er tilrettelagt data for (Figur 1). Nedbørfeltene til målestasjonen bør være skravert slik at man enkelt ser beliggenhet og utbredelse. Stasjonene bør være nummerert og navngitt.

Man velger ut en stasjon ved å klikke på nedbørfeltet. Stasjonen som er valgt bør markeres slik at det til enhver tid er enkelt å se hvilken stasjon som er aktiv. Dette kan for eksempel gjøres ved at nedslagsfeltet får en annen farge eller skravur. I tillegg bør stasjonsnummer, stasjonsnavn og vassdrag være lett synlig i skjermbildet. Stasjonen som er aktiv når brukeren går videre i programmet ligger til grunn for videre analyse.



Figur 1. Forslag til kartpresentasjon.

Datafiler til kartet

Det er laget shape-filer fra Kartulf for 6 stasjoner i teststasjonene. Filene ligger på hvfelles/Prosjekt/Lavvann/Miljøbasert vannføring HV2002/Delprosjekt 2/gis og heter hhv. stasjoner.shp (pil der målestasjonene ligger) og nedslagsfelt.shp (nedslagsfeltet for de respektive målestasjonene). Når flere stasjoner/nedbørfelt skal legges til kan tema 3a/Målestasjoner (alle) og 3a/Målest. totalnedb i Kartulf benyttes.

Feltegenskaper

Sammen med kartet vises også et eget vindu der feltegenskaper for de ulike stasjonene kommer opp (stasjonen velges ved å klikke på kartet). Feltegenskapene skal, ved siden av kartet, gi et grunnlag for å kunne velge ut en representativ stasjon for videre analyse.

Følgende feltegenskaper foreslås (i parentes vises hvor data ligger tilgjengelig):

- (a) Areal (Hydra II)
- (b) Snaufjellprosent (Hydra II)
- (c) Effektiv innsjøprosent (Hydra II)
- (d) Høyeste kote (Hydra II)
- (e) Laveste kote (Hydra II)
- (f) Bre % (Hydra II)
- (g) Middellavrenning (1961-90) (Kartulf: Målest. Totalnedb / Midttilsig (m3/s) evt NVE rapport 2/2001 Avløpsnormaler)
- (h) Periode med uregulerte, komplette data (Hydra II)
- (i) Fylke/kommune (Kartulf? / Hydra II?)
- (j) Vassdrag (Kartulf? / Hydra II?)

Denne bakgrunnsinformasjonen ligger i stor grad tilgjengelig i Hydra II (a-f og h) og Kartulf (g og i-j). I modul 3 'Beregne hydrologiske karakteristika', vil brukeren få tilgang til flere hydrologiske størrelser utover middellavrenningen (g).

Datafiler til feltegenskapene

Foreløpig er det laget en egen fil (hvfelles/Prosjekt/Lavvann/Miljøbasert vannføring HV2002/Delprosjekt2/19.73 Kilåi Bru/feltegenskaper.xls) der feltegenskapene (a-j) er lagret. På sikt bør disse imidlertid hentes direkte fra kilden slik at det ikke nødvendig å opprette en egen database.

Informasjon om hvordan en representativ stasjon skal velges ut

Programmet bør gi brukeren informasjon (i form en tekst) om hvilke feltkarakteristika som er mest sentrale når man skal finne en representativ stasjon for lavvannsanalyse. Kan gjøres ved hjelp av en "knapp" der brukeren klikker dersom han ønsker informasjon. Teksten er ikke formulert, men det kan være en ide å ta utgangspunkt i KS prosedyren for lavvannsanalysen som ligger på hfelles/KS prosjekt 2002/hv/hhi/).

Modul 2 Plotte vannføringsdata

Når brukeren har valgt en stasjon fra kartpresentasjonen kan historiske vannføringsdata framstilles grafisk. Dette vil gi informasjon om de naturlige variasjonene i vassdraget. Videre gis det mulighet til å velge ut hydrogrammer for et vått, et tørt og et middel år som benyttes i de andre modulene i programmet.

Plottevindu

Hovedvinduet i dette skjermbildet er et plottevindu som presenterer historiske vannføringsdata grafisk. Mulighetene til grafiske framstillinger (hydrogrammer), og ligner mye på programmet Dagut som ligger på Start-systemet.

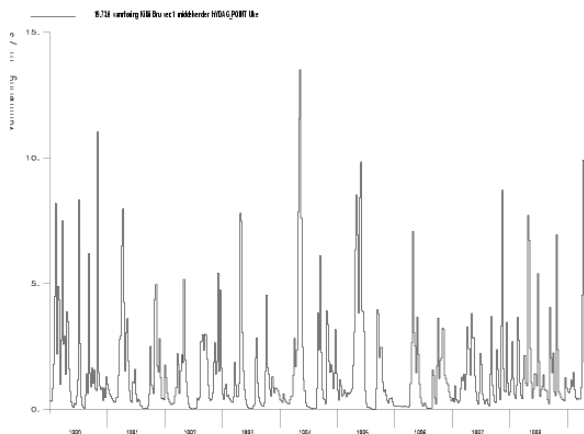
Brukeren har 3 typer av plott å velge mellom:

- Plotte vannføringsdata for et enkelt år (Figur 2)

x-aksen: Tidsakse (Januar – Desember)

y-aksen: Vannføring (m^3/s)

(Plottet kan vises med oppløsning: døgn, uke, måned og år som beskrevet under).



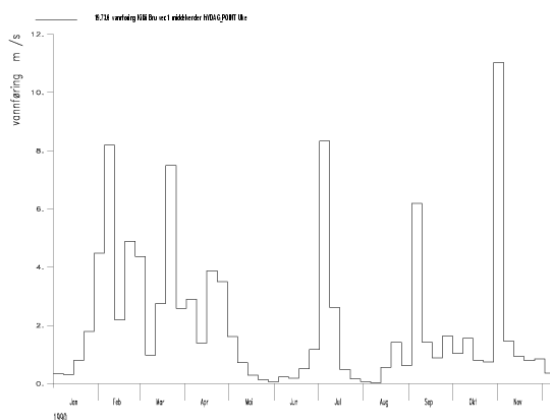
Figur 2. Vannføring for stasjonen 19.73 Kilå Bru i 1990. Oppløsning uke.

- Plotte vannføringsdata for hele observasjonsperioden (Figur 3)

x-aksen: Tidsakse (Fra første år i observasjonsserien – Til siste år i observasjonsserien)

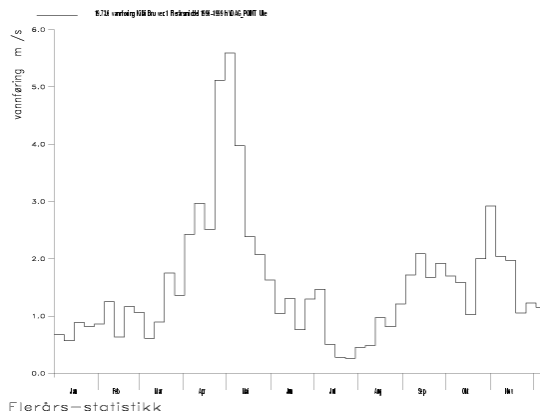
y-aksen: Vannføring (m^3/s)

(Plottet kan vises med oppløsning: døgn, uke, måned og år som beskrevet under).



Figur 3. Vannføring for stasjonen 19.73 Kilå Bru i perioden 1990-1999. Oppløsning uke.

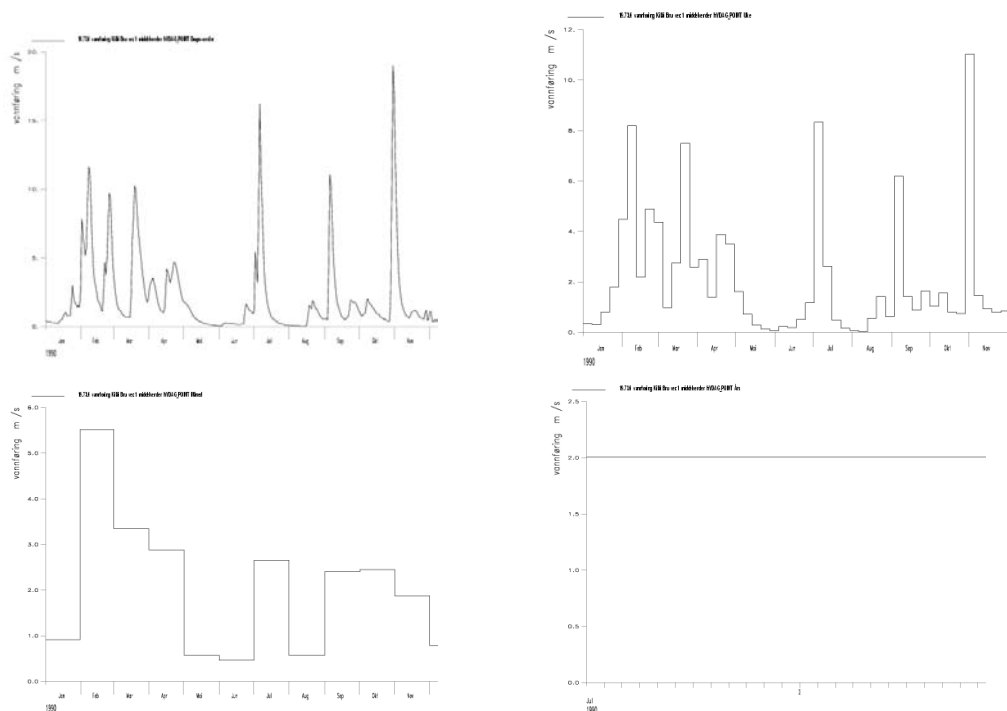
- Plotte middel av vannføringsdata (flerårsmiddel i Dagut) for hele observasjonsperioden (Figur 4)
 - x-aksen: Tidsakse (Januar - Desember)
 - y-aksen: Vannføring (m^3/s)
 - (Plottet kan vises med oppløsning: døgn, uke, måned og år som beskrevet under).



Figur 4. Midlet vannføring for stasjonen 19.73 Kilåi Bru i perioden 1990-1999. Oppløsning uke.

Videre kan plottene presenteres med ulik oppløsning (Figur 5)

- Døgn - Døgnmiddelvannføring
- Uke - Middelvannføring pr uke
- Måned - Middelvannføring pr måned
- År - Årlig midlere vannføring



Figur 5. Vannføring i 1990 ved 19.73 Kilåi Bru. Oppløsning a) døgn, b) uke, c) måned og d) år.

Brukeren velger altså plott ved å gjøre et valg for hhv.

- periode (3 alternativ: enkelt år – hele observasjonsperioden – middel i observasjonsperioden)
- oppløsning (4 alternativ: døgn – uke – måned – år)

I plottevinduet må det framkomme hvilken oppløsning og hvilken periode som ligger til grunn for plottet som til enhver tid vises. Langs y-aksen vises vannføring i m^3/s (evt med l/s km^2 på egen akseskala til høyre i plottet). Det må være enkelt å skifte fra et plott til et annet.

(På sikt bør det være mulig å plotte flere ulike år i samme diagram for lettere å kunne sammenligne ulike år. Det vil og være en fordel om data gis i tabellform i tillegg til plottene).

Datafiler for å lage plottene

Datafilene for stasjonen ligger lagret på hvfelles/Prosjekt/Lavvann/Miljøbasert vannføring HV2002/Delprosjekt 2/19.73 Kilåi Bru/. De ulike plottene er foreløpig laget som ferdige gif-filer som ligger på samme område. Både datafilene og bildefilene er generert i Dagut. På sikt bør kun den opprinnelige dataserien med døgnmiddel-vannføring lagres slik at de ulike plottene genereres av programmet fra gang til gang. Hvis ikke blir det mye jobb med tilrettelegging og oppdatering.

Søkemulighet

Brukeren bør også ha mulighet til å kunne gjøre visse søk etter mønsteret: ”Finn året med lavest årsmiddelvannføring i observasjonsperioden”, ”Finn det året med laveste månedsmiddel i observasjonsperioden” eller ”Finn det året med lavest 90 persentil i observasjonsperioden” for deretter å få vist data i plottevinduet med ønsket oppløsning.

Algoritmer for ulike søkemuligheter er ikke etablert, men målet er å kunne gi brukeren objektive utvelgelseskriterier for hva som karakteriserer de ulike årene i observasjonsperioden. I avsnitt 3 'Beregne hydrologiske karakteristika' er en oversikt over størrelser som kan brukes som søkingen. Søkemulighetene behøver ikke begrense seg til lavvannsverdier.

Utvalgte år: Vått, middel og tørt år

I modul 2 skal brukeren også ha muligheten til å definere/velge ut hydrogrammer for tre år: et middels, et vått og et tørt år. Disse hydrogrammene kan benyttes i de andre modulene i programmet. I skjermbildet er det gjort plass til et plottevindu der de utvalgte hydrogrammene er plottet slik at brukeren kan se hvilke hydrogrammer det til enhver tid refereres til (Figur 6). Presentasjonen av plottene er identisk med hovedplottevinduet, og man bør ha samme mulighet til å velge ønsket oppløsning.

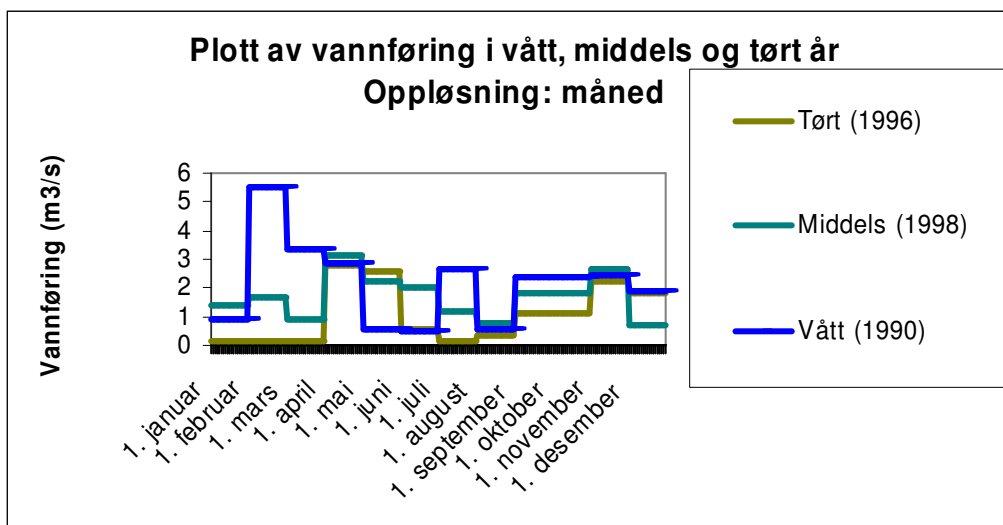
De tre utvalgte årene kan velges ut enten automatiske eller manuelt. Ved et automatisk valg kan det legges inn ulike objektive kriterier for hva som er et middel, vått og tørt år som for eksempel:

Middel: Flerårsmiddel med oppløsning døgn, uke eller måned

Median året

Vått/tørt år: Året med høyest/lavest årsmiddelvannføring

Året med høyest/lavest månedsmiddelvannføring



Figur 6. Plott av vått, middels og tørt år.

Automatisk valg forutsetter imidlertid at søkefunksjonen (beskrevet over) er etablert. Foreløpig må derfor brukeren definere de tre årene (vått – middels og tørt) manuelt. Et manuelt valg skjer ved at det plottet som ligger i hovedplottvinduet ”overføres” til det utvalgte året (eks.: man vet at sommeren i et spesielt år hadde langvarig tørke som skapte problemer i regionen og ønsker at dette skal være et tørt år eller man ser på data for stasjonen og gjør seg opp en mening om hvilke år som kan være egnet for å beskrive vått/middels eller tørt år).

Modul 3 Beregne hydrologiske karakteristika (lavvannskarakteristika)

I denne modulen får man beregnet ulike hydrologiske karakteristika for den valgte dataserien og plottet disse sammen med historiske vannføringsdata. (I modulen ligger også tilgang til programvare for å estimere lavvannskarakteristika for felt uten målinger (program LAVVANN)).

Hydrologiske karakteristika

I denne modulen beregner programmet ulike hydrologiske karakteristika for den valgte stasjonen. Dette gjelder både lavvannskarakteristika, flom- og middelveier. Forslag til hydrologiske størrelser som brukeren bør ha tilgang til (bør oppgis i både m^3/s og l/s km^2):

Lavvann

- Alminnelig lavvannføring (e-tabell)
- MAM (1) (dagut)
- MAM (7) (dagut)
- MAM (30) (dagut)
- Laveste observerte døgnverdi i observasjonsperioden (dagut)
- Laveste observerte ukesmiddel i observasjonsperioden (dagut)
- Laveste observerte månedsmiddel i observasjonsperioden (dagut)
- 95-persentil (år og sesong, sommer: april-september, vinter oktober-mars) (varkurv)
- 90-persentil (år og sesong, sommer: april-september, vinter oktober-mars) (varkurv)
- 75-persentil (år og sesong, sommer: april-september, vinter oktober-mars) (varkurv)

Flom/Høye vannføringer

- Middelflom (ekstrem/dagut)
- 5-års flom (ekstrem/dagut)
- 10-års flom (ekstrem/dagut)
- 50-års flom (ekstrem/dagut)
- Høyeste observerte døgnverdi i observasjonsperioden (dagut)
- Høyeste observerte ukesmiddel i observasjonsperioden (dagut)
- Høyeste observert månedsmiddel i observasjonsperioden (dagut)
- 5-persentil (år) (varkurv)
- 10-persentil (år) (varkurv)
- 25-persentil (år) (varkurv)

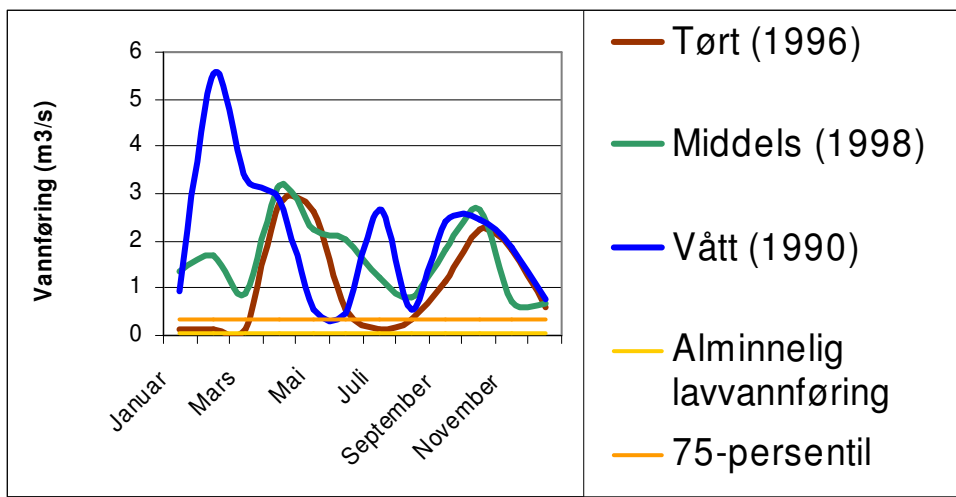
Middelvannføring

- Middelvannføring 1961-90 (kartulf)
- Middelvannføring i observasjonsperioden (dagut)

Verdiene er beregnet vha. program i Start-systemet, og ligger lagret i fila: hvfelles/Prosjekt/Lavvann/ Miljøbasert vannføring HV2002/Delprosjekt 2/19.73 Kilåi Bru/Feltegenskaper.xls. Programmet som er benyttet i beregningen er notert i parentes i oversikten over. Det vil være hensiktsmessig om programmet kan beregne disse størrelsene direkte (evt. ha en link til programmet på Start-systemet). Innholdet i lista kan diskuteres. Foreløpig benyttes bare et utvalg av karakteristika i programmet. Brukeren bør og få muligheten til å få en enkel beskrivelse av de ulike karakteristika som det refereres til (eks: '95-persentilen er den vannføringen som overskrides i 95% av dagene i observasjonsperioden' og 'Middelflom er gjennomsnittet av den største vannføringen hvert år i observasjonsperioden').

Plotting av hydrologiske karakteristika

Ved siden av å vise tallstørrelsen for de ulike hydrologiske karakteristika, bør man ha mulighet til å plote dem sammen med de utvalgte årene. I plotevinduet vises hydrogrammet for vått, tørt og middels år hvis de er valgt fra modul 2. Videre kan brukeren be om at plottet også viser en eller flere av de størrelsene som er beregnet. For hver graf som tegnes på plottet må de være en "ID" slik at man lett får oversikt over hva plottet viser (Figur 7).



Figur 7. Vannføring i vått, tørt og middelsår plottet sammen med alminnelig lavvannføring og 75-persentil.

Modul 4 Minstevannføring / Restvannføring

Programmet har to ulike tilnærminger forhold til minstevannføringspålegg og restvannføring. 4.1 'Plott minstevannføringspålegg' forutsetter at brukeren har kartlagt de ulike behovene for restvannføring, og gir en grafisk framstilling av pålegget. 4.2 'Restvannføring etter uttak' tar derimot utgangspunkt i de naturlige vannføringsvariasjonene og viser hvordan uttak etter gitte kriterier slår ut på restvannføringen. For begge alternativene kan minstevannføring/restvannføring plottes sammen med hydrogrammene for middel, vått og tørt år.

4.1 Plott minstevannføringspålegg

Denne modulen forutsetter at brukeren har kartlagt de ulike brukerinteressene i vassdraget som skal tilgodesees med minstevannføringspålegget. Videre må de ulike brukerinteressenes behov for vann være kjent (eksempel i Tabell 1).

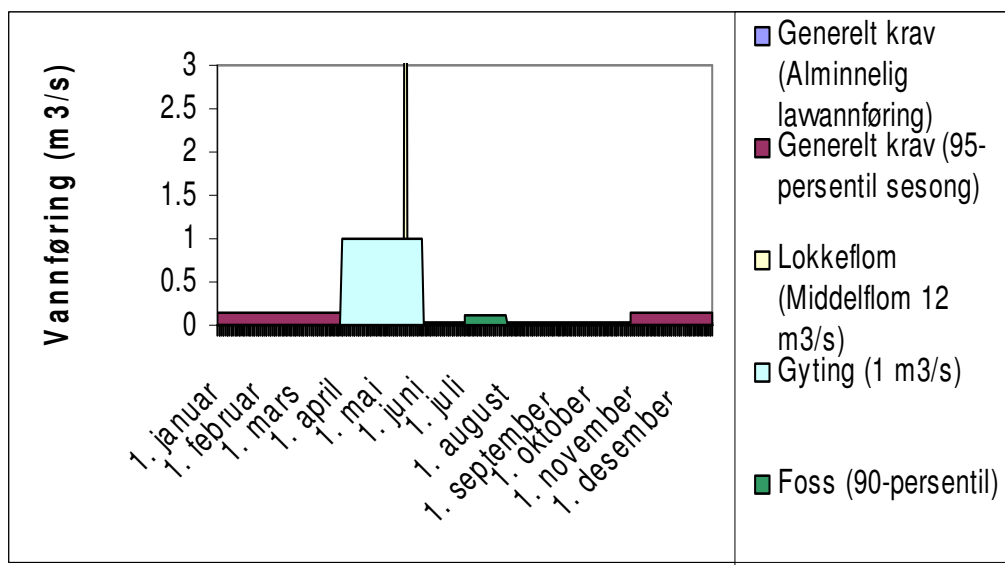
Tabell 1. Eksempel på kartlegging av behovet for restvannføring i et regulert vassdrag.

Brukerinteresse	Behov for vann	Tid
Generelt krav om minste-vannføring	Alminnelig lavvannføring	Hele året
Lokkeflom	Middelflom	2 døgn i løpet av mai
Vann til gyting	5 l/s km ²	April og mai
Vann til fossefall i turist-sesongen	10-persentil	Juli

Programmet ber brukeren definere/"navngi" de ulike brukerinteressene. For hver brukerinteresse spesifiseres hvilken tidsperiode pålegget gjelder (fra dato – til dato) og hvilken vannføring som skal benyttes. Vannføringen kan enten bestemmes ved at 1) brukeren oppgir vannføringen i m³/s (evt l/s km²) eller 2) ved å velge en hydrologisk

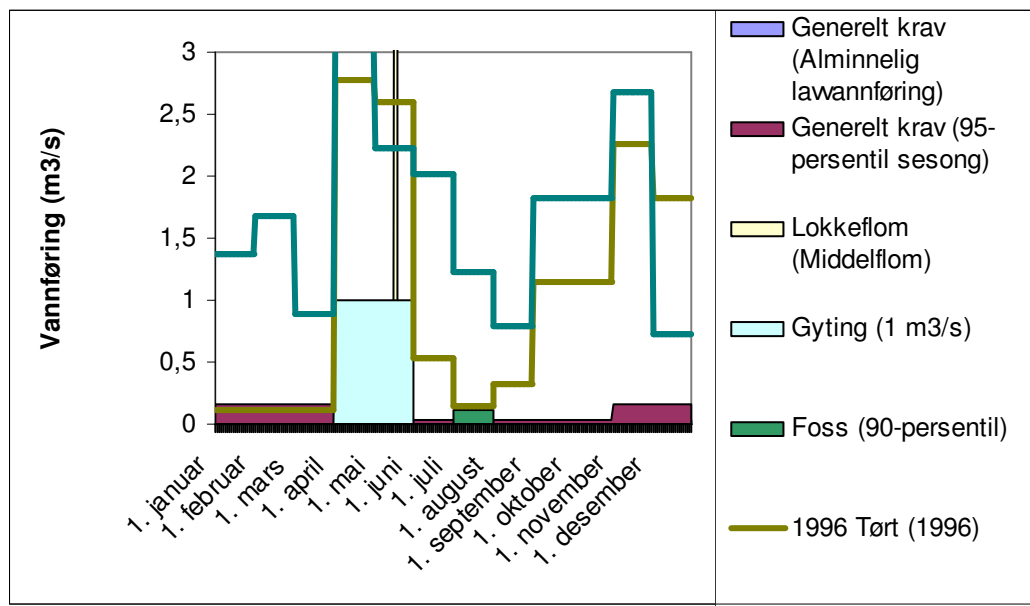
beregnet størrelse som for eksempel en persentil fra varighetskurven, t-års flom eller alminnelig lavvannføring benyttes. En oversikt over hydrologiske karakteristika (2) som kan være av interesse er beskrevet i modul 3. Hvis brukeren derimot ønsker å benytte en bestemt vannføring (1) må denne størrelsen tastes inn manuelt.

I skjermbildet vises også et plottevindu hvor et eller flere av påleggene for de ulike brukerinteressene kan plottes (Figur 8). Sammen med plottet må det være en tegnforklaring slik at de ulike brukerinteressene lett kan skilles fra hverandre. Hvis brukeren endrer på et av minstevannføringspåleggene skal plottet oppdateres automatisk.



Figur 8. Plott over "tenkt" minstevannføringspålegg. Brukeren har definert 5 ulike brukerinteresser.

Sammen med plottet som viser det totale minstevannføringspålegget skal man og kunne plote vannføringen for et vått, middels og tørt år (Figur 9).



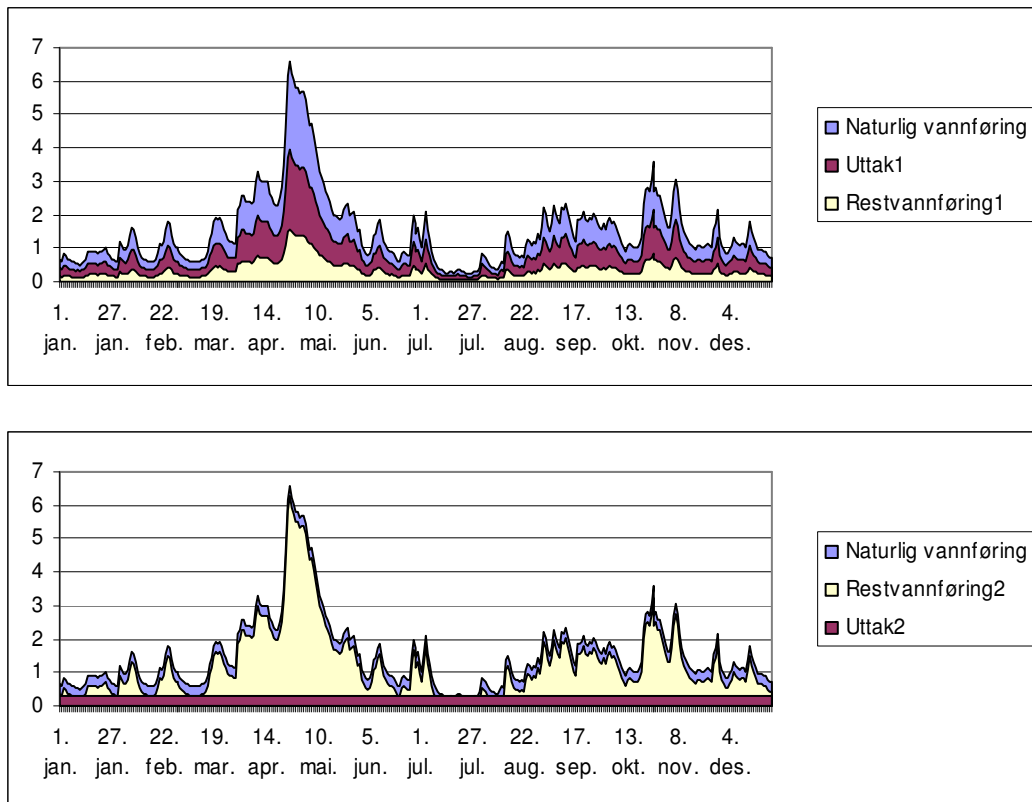
Figur 9. Plott over "tenkt" minstevannføringspålegg og vannføring i middels og tørt år.

4.2 Restvannføring etter uttak

Denne tilnærmingen kan brukes for å vurdere hvordan et vannuttak kan gjøres så "skånsomt" som mulig i forhold til de naturlige vannføringsvariasjonene i vassdraget. Med utgangspunkt i vassdraget naturlige variasjoner vises restvannføringen som en funksjon av uttak gitt etter ulike kriterier. Målet er å kunne ta ut vann (for eksempel i verna vassdrag) samtidig som restvannføringen ivaretar en del av vassdragets naturlige variasjoner.

Figurene som er benyttet ligger på fila hvfelles/Prosjekt/Lavvann/Miljøbasert vannføring HV2002/Delprosjekt 2/19.73 Kilåi Bru/figurer.xls arkfan kap 4-2 (3).

Utgangspunktet er at: Naturlig vannføring i vassdraget = Uttak + Restvannføring. Vannføringene angis i m³/s fordelt over året med ønsket oppløsning (måned, uke, døgn). 2 eksempler (oppløsning døgn) er vist i Figur 10.



Figur 10. Eksempler på fordeling på restvannføring og uttak. Naturlig vannføring = Uttak + Restvannføring.

Også i denne modulen er et plottevinduet sentralt. Plottevinduet viser naturlig vannføring, uttak og restvannføring fordelt over året. I tillegg skal brukeren og ha anledning til å flutte vannføringsvariasjonene i vått, middels og tørt år. Som tidligere bør man ha muligheten til å velge oppløsning selv (døgn, uke, måned eller år).

For å beskrive vassdragets naturlige vannføring benyttes hydrogrammet for flerårsmiddelet i observasjonsperioden (beskrevet i modul 2).

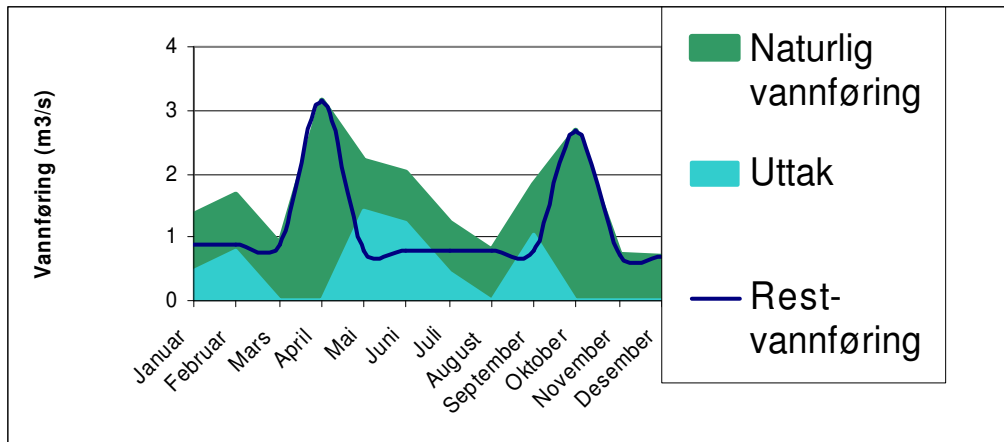
Brukeren oppgir volumet på enten uttaket eller restvannføringen. Dette kan gjøres enten ved å 1) oppgi et volum (mill m³ pr år) eller 2) som en prosentandel av middel-vannføringen.

Videre må brukeren gi kriterier for hvordan uttaket/restvannføringen (velges av brukeren) skal være. Brukeren kan selv velge om det er uttaket eller restvannføringen kriteriene skal gjelde for. Innledningsvis foreslås følgende kriterier for uttaket:

- Uttaket skal være jevnt over året
- Jevnt uttak i 2 sesonger
- Uttaket skal være en %-andel av naturlig vannføring gjennom året

..og følgende kriterier for restvannføringen:

- Restvannføringen skal være en %-andel av naturlig vannføring gjennom året
- Restvannføringen skal bevare variasjonsbredden (høyeste og laveste observerte vannføring) gjennom året. For eksempel vil man bevare flomtoppen, men det er ikke behov for å bevare selve flomvolumet (Figur 11)



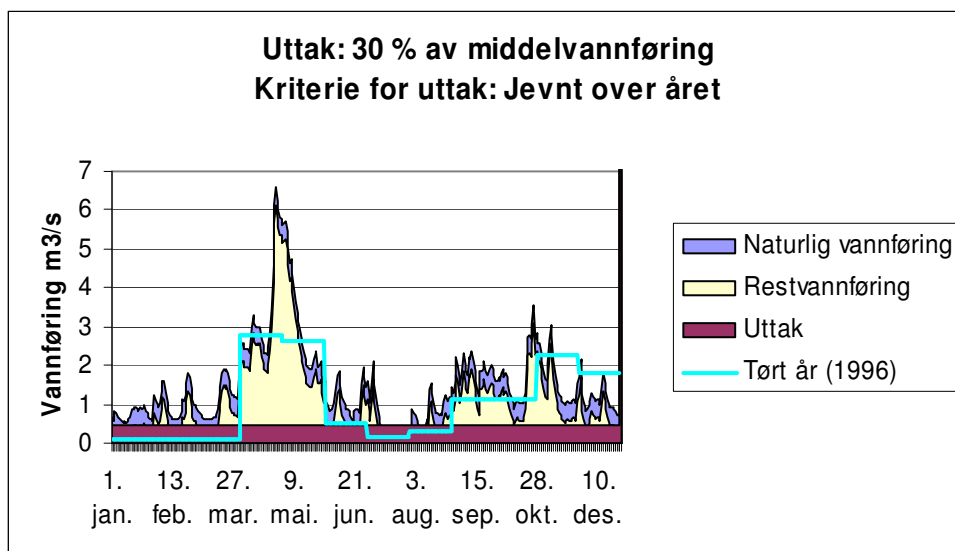
Figur 11. Eksempel på fordeling mellom restvannføring og uttak. Kravet til restvannføringen er at både høye og lave vannføringer i det naturlige vannføringsregimet skal ivaretas. Uttak = Naturlig vannføring – Restvannføring.

Det må etableres algoritmer for utregning av restvannføring og uttak som funksjon av de naturlige vannføringsvariasjonene. Eksempler og enkel beskrivelse følger under. For alle eksemplene gjelder at restvannføringen utgjør 70 % av middelvannføringen (kan defineres av bruker i programmet) og at plottene presenteres med oppløsning på døgn nivå.

Uttaket skal være jevnt over året (Figur 12):

Naturlig vannføring = Uttak + Restvannføring der

Naturlig vannføring: Flerårsmiddel i observasjonsperioden (døgnnivå)
 Uttak: 30 % av middelvannføringen fordelt jevnt gjennom året
 Restvannføring: Naturlig vannføring (døgnnivå) – Uttak (døgnnivå)



Figur 12. Naturlig vannføring, restvannføring og uttak plottet sammen med vannføringen i et tørt år. Uttak: 30 % av middelvannføring. Kriterium for uttak: Jevnt uttak over året.

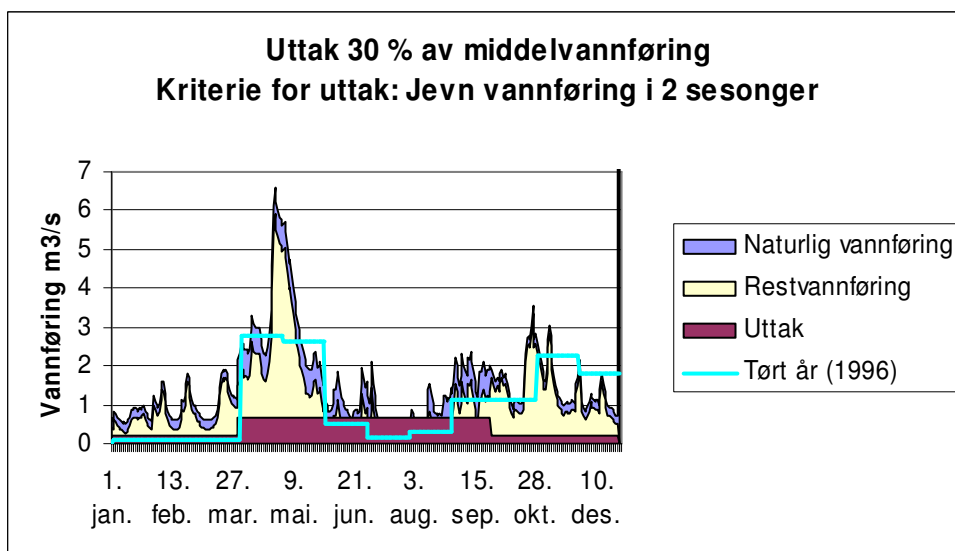
Jevnt uttak i 2 sesonger (Figur 13):

Naturlig vannføring = Uttak + Restvannføring der

Naturlig vannføring: Flerårsmiddel i observasjonsperioden (døggnivå)

Uttak: 30 % av middelvannføringen. I sommerhalvåret (apr - sep) er uttaket tenkt å være 2/3 av middelvannføringen, mens i vinterhalvåret (okt – mars) er uttaket tenkt å være 1/3 av middelvannføringen.

Restvannføring: Naturlig vannføring (døggnivå) – Uttak (døggnivå)



Figur 13. Naturlig vannføring, restvannføring og uttak plottet sammen med vannføringen i et tørt år. Uttak: 30 % av middelvannføring. Kriterium for uttak: Jevnt uttak i 2 sesonger.

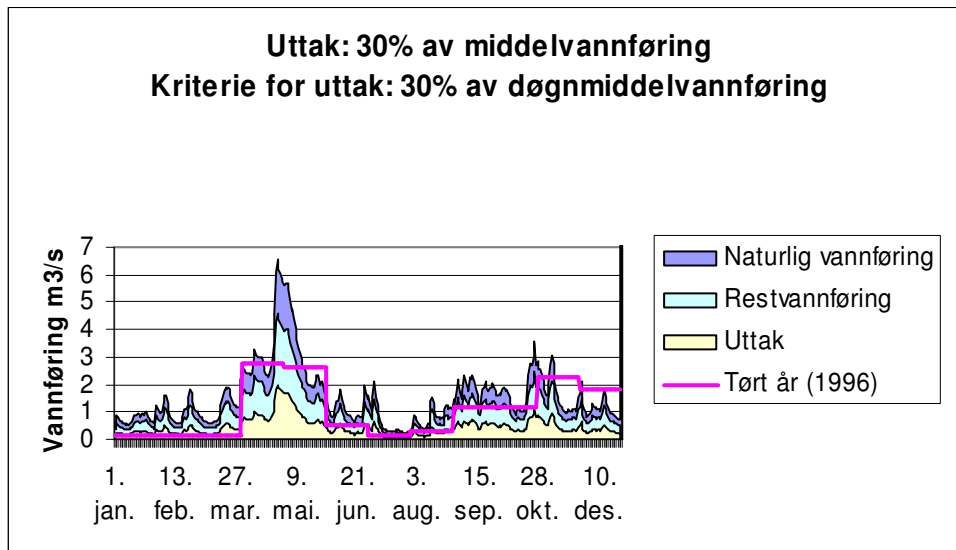
Uttaket skal være en %-andel av naturlig vannføring gjennom året (uttaket er større når det er "mye" vann i vassdraget enn når det er "lite") (Figur 14):

Naturlig vannføring = Uttak + Restvannføring der

Naturlig vannføring: Flerårsmiddel i observasjonsperioden (døggnivå)

Uttak: 30 % av døgnmiddelvannføringen hvert døgn.

Restvannføring: Naturlig vannføring (døggnivå) – Uttak (døggnivå)



Figur 14. Naturlig vannføring, restvannføring og uttak plottet sammen med vannføringen i et tørt år. Uttak: 30 % av middelvannføring. Kriterium for uttak: 30% av døgnmiddelvannføring.

Restvannføringen skal være en %-andel av naturlig vannføring gjennom året (Figur 15)

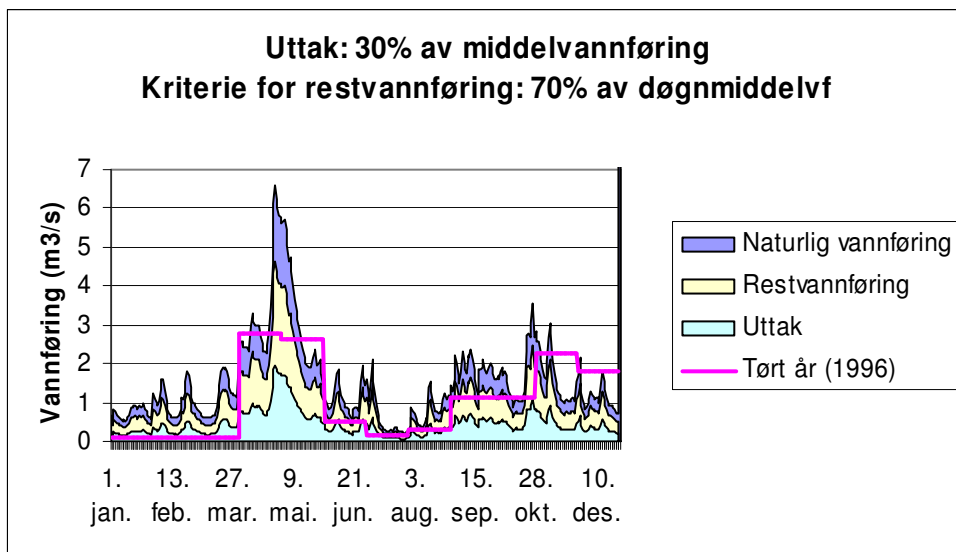
(Dette alternativet er oppbygd identisk med forrige plott 'Uttaket skal være en %-andel av naturlig vannføring gjennom året').

Naturlig vannføring = Uttak + Restvannføring der

Naturlig vannføring: Flerårsmiddel i observasjonsperioden (døggnivå)

Restvannføring: 70 % av døgnmiddelvannføringen hvert døgn.

Uttak: Naturlig vannføring (døggnivå) – Restvannføring (døggnivå)



Figur 15. Naturlig vannføring, restvannføring og uttak plottet sammen med vannføringen i et tørt år. Uttak: 30 % av middelvannføring. Kriterium for restvannføring: 70% av døgnmiddelvannføring.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i rapportserien Miljøbasert vannføring:

- Nr. 1-02 Thomas Skaugen, Marit Astrup, Zelalem Mengistu, Bjarne Krokli: Lavvannføring - estimering og konsesjonsgrunnlag (28 s.)
- Nr. 1-03 Eva B. Thorstad, Finn Økland, Nils Arne Hvidsten, Peder Fiske, Kim Aarestrup: Oppvandring av laks i forhold til redusert vannføring og lokkeflommer i regulerte vassdrag (51 s.)
- Nr. 2-03 Per Ivar Bergan, Carsten S. Jensen, Finn R. Gravem, Jan Henning L'Abée-Lund, Anders Lamberg, Peder Fiske: Krav til vannføring og temperatur for oppvandring av laks og sjørret (63 s.)
- Nr. 1-04 Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Panagiotis Dimakis: Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z) Rapport 1. Formål og metoder (67 s.)
- Nr. 2-04 Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Panagiotis Dimakis, Bjørn Frengstad: Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 2. Materiale og feltmålinger (113 s.)
- Nr. 3-04 Hervé Colleuille, Wai Kwok Wong, Panagiotis Dimakis: Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 3. Grunnvannsmodellering (114 s.)
- Nr. 4-04 Bjørn Ove Johnsen og Nils Arne Hvidsten: Krav til vannføring i sterkt regulerte smålaksvassdrag (68 s.)
- Nr. 5-04 Torulv Tjomsland: Abiotiske effekter i reguleringsmagasiner. Temperatur- og isforhold i Follsjøen og i vassdraget nedenfor (25 s.)
- Nr. 6-04 Svein Jakob Saltveit, Peder Fiske, Åge Brabrand, Harald Sægrov, Ola Ugedal: Bruk av fangst statistikk for å belyse effekt av endret vannføring på fisk (46 s.)
- Nr. 7-04 Peder Fiske, Arne Johan Jensen: Mot en modell for sammenhengen mellom vannføring og fiskeproduksjon. Fase 1 - Evaluering av presmoltsammenhenger (30 s.)
- Nr. 1-05 Hans-Petter Fjeldstad, Tharan Fergus, Nils Reidar Bøe Olsen: Habitatforbedrende tiltak - geomorfologiske prosesser, sedimenttransport, erosjon og simulering av optimale forhold for fisk (34 s.)
- Nr. 2-05 Åge Brabrand, Trond Bremnes, Svein Jakob Saltveit, Andreas G. Koestler, Jim Bogen: Økologisk betydning av grunnvann for bunndyr og fisk (64 s.)
- Nr. 3-05 Gunnar G. Raddum, Arne Fjellheim, Gaute Velle: Populasjonsstrukturen hos bunndyr i Aurlandselva i relasjon til endringer i vannføring og temperatur (48 s.)
- Nr. 4-05 Arve Misund, Hervé Colleuille, Oddmund Soldal: Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom grunnvann og ellevann i et typisk vestlandsdalføre: Osa, Hordaland (84 s.)
- Nr. 5-05 Wai Kwok Wong, Hervé Colleuille: Elv og grunnvann. Estimering av grunnvannsbidrag til det totale avløpet ved hydrogramseparering (62 s.)
- Nr. 6-05 Thomas Væringstad, Hege Hisdal: Estimering av alminnelig lavvannføring i umålte felt (40 s.)
- Nr. 7-05 Hege Hisdal: Regional metodikk for estimering av lavvannskarakteristika (53 s.)