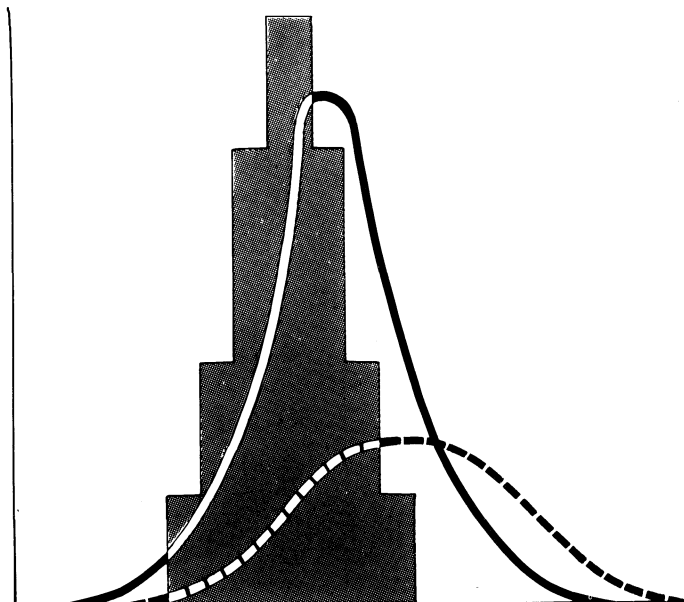


V¹-INFORMASJON



**BEREGNING AV DIMENSJONERENDE
OG PÅREGNELIG MAKSIMAL FLOM
RETNINGSLINJER**



**NORGES VASSDRAGS- OG ENERGIVERK
VASSDRAGSDIREKTORATET**

1986



NORGES
VASSDRAGS- OG ENERGIVERK
VASSDRAGSDIREKTORATET

V - informasjon

Tittel Beregning av dimensjonerende og påregnelig maksimal flom. Retningslinjer.	Nr 1
Forfatter(e) / Saksbehandler(e) Retningslinjene er utarbeidet som et samarbeid mellom en rekke saksbehandlere ved Hydrologisk avdeling, NVE.	Dato Mars 1986
Kontaktpersoner: D. Lundquist, L.-E. Pettersson, E. Skofteland, N.R. Sælthun.	ISBN 82-554-0447-3

Sammendrag

Denne V-informasjon gir retningslinjer for de hydrologiske beregninger som er nødvendige for å fastlegge dimensjonerende tilløps- og avløpsflom, påregnelig maksimal tilløps- og avløpsflom, med tilhørende vannstander i magasinet.

Abstract

The report describes the hydrological calculations necessary to establish the design inflow and outflow floods, the probable maximum inflow and outflow floods, and the corresponding reservoir water levels.

Emneord

Dimensjonerende flom.

Påregnelig maksimal flom.

Subject terms

Design flood.

Probable maximum flood.

Ansvarlig underskrift

Pål Mellquist
Vassdragsdirektør

FORORD

Det har i de senere år vært en stadig utvikling av den metodikk som benyttes i Norge ved beregning av flommer. Dette arbeid ble særlig aktualisert da "Forskrifter for dammer" [1] ble gjort gjeldende fra 1. januar 1981 og stilte en rekke krav til slike beregninger.

De foreliggende retningslinjer for beregning av dimensjonerende og påregnelig maksimal flom er utarbeidet av Vassdragsdirektoratet, Hydrologisk avdeling. Retningslinjene gir status for den metodikk vi har tilgjengelig når denne rapporten trykkes. Det foregår imidlertid en stadig utvikling på dette området og man må regne med kompletteringer og endringer i tiden fremover. Dette gjelder særlig beregninger i store og sammensatte felt og er knyttet til problemer med estimat av påregnelige maksimale nedbørverdier og fastsettelse av nedbørfordeling i tid og rom. Disse forhold vil bli videre undersøkt av Det Norske Meteorologiske Institutt i et prosjekt som ventes avsluttet ved utløpet av 1987.

Ved beregning av dimensjonerende og påregnelig maksimal flom er det ikke til å unngå at skjønnsmessige vurderinger må foretaes. Retningslinjene er imidlertid forsøkt utformet slik at slike vurderinger får minst mulig innflytelse på det endelige resultat. Det er likevel viktig å være klar over at beregninger av så ekstreme hendelser som det her dreier seg om alltid vil ha karakter av estimer.

Oslo, mars 1986



Pål Mellquist
Vassdragsdirektør

INNHold

	Side
1. INNLEDNING	3
2. BEREGNINGSFORUTSETNINGER	4
3. DATAGRUNNLAG	5
3.1. Tidsoppløsning	5
3.2. Meteorologiske data	6
3.2.1. Data med fin tidsoppløsning	6
3.2.2. Døgnlige data	6
3.2.3. Ekstreme nedbørverdier	7
3.3. Hydrologiske data	7
3.3.1. Generelt	7
3.3.2. Kvalitetskontroll	7
3.3.3. Observerte data	8
3.4. Feltparametre	8
4. BEREGNING AV DIMENSJONERENDE TILLØPSFLOM	9
4.1. Generell metodikk	9
4.2. Sesonginndeling	9
4.3. Flomvarighet	10
4.4. Beregning av tilløpsflommens størrelse og forløp	10
4.5. Trinn i beregningen	14
5. BEREGNING AV PÅREGNELIG MAKSIMAL TILLØPSFLOM	15
5.1. Generell metodikk	15
5.2. Nedbør/snøsmelting	15
5.2.1. Sesonginndeling	16
5.2.2. Varighet	16
5.2.3. Arealreduksjon	17
5.2.4. Fordeling i tid	17
5.2.5. Snøsmelting	17
5.2.6. Kombinert snøsmelting-nedbørforløp	18
5.3. Nedbør-avløpsmodeller	20
5.3.1. Generelt	20
5.3.2. Flommodellen	20
5.4. Simulering av påregnelig maksimal tilløpsflom	22
5.5. Trinn i beregningen	22
6. BEREGNING AV FLOMVANNSTAND OG AVLØPSFLOM	23
6.1. Generelt	23
6.2. Ruting gjennom ett magasin	23
6.3. Ruting gjennom flere magasiner	23
6.4. Trinn i beregningen	24
7. FLOMBEREKNING I SAMMENSATTE FELT	24
7.1. Generelt	24
7.2. Dimensjonerende tilløpsflom	25
7.3. Påregnelig maksimal flom	26
7.3.1. Nedbør jevnt fordelt over totalfeltet	26
7.3.2. Nedbør sentrert over lokalfeltet	27
7.3.3. Store, sammensatte felt	29
8. SUMMARY IN ENGLISH	30
9. REFERANSER	32

1. INNLEDNING

I "Forskrifter for dammer" [1], som ble fastsatt ved kongelig resolusjon av 14. november 1980 og gjort gjeldene fra 1. januar 1981, heter det om beregning av flommer og flomvannstander (kapittel 7):

"Det skal utføres hydrologiske beregninger for å fastlegge dimensjonerende tilløpsflom, dimensjonerende avløpsflom, påregnelig maksimal tilløpsflom og påregnelig maksimal avløpsflom, med tilhørende vannstander i magasinet.

Flomberegningene skal ha som mål å fastsette de nødvendige data for dimensjonering av dammen og avløpsorganene, og skal også gi grunnlag for fastsettelse av flomløpenes kapasitet, karakteristik og manøvrering.

Dimensjonerende tilløpsflom skal anvendes ved de beregninger av vannstander og vannføringer som legges til grunn for dimensjonering av dam med flomløp og flomavledningsorganer, mens påregnelig maksimal tilløpsflom skal legges til grunn for beregningene ved kontroll av dammens sikkerhet mot brudd".

Videre heter det i forskriftene (kapittel 7):

"Det skal påvises at flomforholdene i vassdraget nedenfor dammen såvidt mulig ikke forverres i forhold til naturlig tilstand, eller at vannføringen ikke overskrider eventuelle fastsatte grenser".

Vassdragsdirektoratet, ved Hydrologisk avdeling og Vassdragsavdelingen, har et overordnet ansvar når det gjelder hydrologiske beregninger og de forutsetninger som legges til grunn for disse. Hydrologisk avdeling skal godkjenne alle hydrologiske beregninger som må gjøres i henhold til damforskriftene. Avdelingen vil i stor grad selv utføre slike beregninger, men de vil også kunne utføres av regulanten eller rådgivende ingeniørfirmaer. De tekniske forutsetningene knyttet til reguleringssystemet og manøvreringsreglementet, skal være akseptert av Vassdragsavdelingen før de hydrologiske beregninger gjennomføres.

Definisjoner

- Tilløpsflom er flom til magasinet fra uregulert felt, tillagt avløpsflom fra ovenforliggende magasiner og overføringer.
- Dimensjonerende tilløpsflom er den tilløpsflom som har et gjentaksintervall på 1000 år. I spesielle tilfelle kan Vassdragsdirektoratet fastsette et annet gjentaksintervall.
- Dimensjonerende avløpsflom er flommen ut av magasinet forårsaket av dimensjonerende tilløpsflom under gitte initialbetingelser og som flomavledningsorganene skal kunne avlede.
- Dimensjonerende flomvannstand er den høyeste vannstand i magasinet ved dimensjonerende avløpsflom.

- Påregnelig maksimal nedbør (PMP) er den maksimale nedbør av en gitt varighet som er mulig i et gitt felt og til en bestemt tid av året.
- Påregnelig maksimal tilløpsflom (PMF) er den største tilløpsflom som kan opptre i et felt, når det er tatt hensyn til ovenforliggende magasiner og overføringer. En PMF er forårsaket av PMP og tillagt eventuell snøsmelting og kan ikke knyttes til et bestemt gjentakintervall. Den fastsettes på grunnlag av en analyse av ugunstige kombinasjoner av meteorologiske og hydrologiske forhold.
- Påregnelig maksimal avløpsflom er flommen ut av magasinet forårsaket av påregnelig maksimal tilløpsflom under gitte initialbetingelser og med åpne flomavledningsorganer.
- Maksimal flomvannstand er den høyeste vannstand i magasinet ved påregnelig maksimal avløpsflom.

2. BEREGNINGSFORUTSETNINGER

Beregningsforutsetningene når det gjelder overføringer, kraftverk, manøvrerbare tappearrangementer, initialtilstander, osv. fastlegges i samråd med Vassdragsdirektoratet.

Ved bestemmelse av tilløpsflom skal det som regel forutsettes at eventuelle manøvrerbare konstruksjoner i overføringssystemet kan være ute av funksjon eller ikke manøvreres som forutsatt. Det bør således i beregningene tas hensyn til at eventuelle overføringer til feltet ikke kan stenges og at overføringer fra feltet kan være blokkert. Dette gjelder ved fastsettelse av både dimensjonerende tilløpsflom og påregnelig maksimal tilløpsflom.

Kapasiteten til flomløp, tappearrangementer og overføringer må også bestemmes i samråd med Vassdragsdirektoratet. Hvis ikke opplysninger om kapasiteter foreligger, må disse beregnes.

Ved faste overløp beskrives kapasiteten av overløpskoeffisienten og overløpets lengde. Overløpskoeffisienten er avhengig av overløpets utforming, vannstandsstigningen over terskelen og dybdeforholdene ved dammen. Ved mer komplekse dammer må det tas hensyn til de forskjellige segmentenes utforming, dvs. forskjellige verdier på overløpskoeffisient og terskelnivå, sidekontraksjon ved pilarer, eventuelle hindringer som gangbru over dammene osv. Opplysningene innhentes fra damtegnninger og ved eventuell befaring. Det er viktig å påse at beregnet kapasitet også gjelder ved de høye vannstander som vil opptre ved ekstreme flommer.

Størrelsen av samtlige involverte magasiner må klarlegges. Magasinene beskrives av to eller flere vannstander med tilhørende magasinivolum. Disse vannstander skal dekke det intervall som flomvannstandene vil befinne seg i. Hvis ikke magasinkurve eller -tabell foreligger, beregnes volumet ut fra sjøarealet ved høyest regulert vannstand (HRV).

Vannstanden ved flommens begynnelse antas å være HRV, dersom ikke annet er spesielt fastsatt. I store magasiner kan det ved vårflommer være urealistisk å regne med oppfylt magasin og samtidig stor snøbeholdning i feltet. I slike tilfeller må initialvannstanden i magasinet fastsettes i samråd med Vassdragsdirektoratet.

Ved beregning av ekstreme flommer skal det alltid antas at feltet er mettet på vann før flommen begynner. Dette er en viktig forutsetning for bruk av flommodellen som beskrives i avsnitt 5.3.2. Ved flomsimulering i modellen bør initialvannføringen settes lik middelvannføringen i den aktuelle sesongen.

I følgende tabell er det gitt en sammenfatning av de viktigste momentene i beregningenes startfase:

Rekkefølge og omfang av mellomberegninger i analysen (oppgave-definisjon):	
■ Planlagte reguleringer ■ Eldre reguleringer ■ Feltgrenser ■ Feltoppdeling	
Funksjon ved flomforhold og kapasiteter (reguleringsforutsetninger):	
■ Overføringer ■ Kraftverker ■ Tappeluker	
Magasinspesifikasjoner:	
■ Magasinvolum (magasintabell) ■ Flomløp m.m. (avløpskurve)	
Initialbetingelser:	
■ Startvannstand i magasin ■ Startvannføring i tilløp ■ Startinnhold i markvann ■ Startinnhold i snømagasin	} For alle beregninger For enkelte modellberegninger

3. DATAGRUNNLAG

3.1. Tidsoppløsning

Den tidsoppløsning som skal brukes ved flomberegningen for å beskrive tilløpsflommens forløp må vurderes ut fra feltstørrelsen og ut fra magasinets størrelse. Vanligvis vil det være tilstrekkelig med en tidsoppløsning på 6 timer for felter større enn 100 km² og 3 timer for felter mindre enn 100 km². For små

felder kan det være nødvendig å velge en langt finere tidsoppløsning.

3.2. Meteorologiske data

Nedbør- og lufttemperaturdata trenges ofte i forbindelse med en flomberegning. Observerte data, enten med fin tidsoppløsning eller i form av døgnlige verdier, og beregnede verdier for ekstrem nedbør kan bestilles fra Det Norske Meteorologiske Institutt (DNMI).

3.2.1. Data med fin tidsoppløsning

Særlig i forbindelse med modellkalibrering kan det være behov for nedbørdata med finere tidsoppløsning enn ett døgn. DNMI har en rekke stasjoner hvor nedbøren registreres kontinuerlig med pluviografer. Slike nedbørdata kan sammen med kontinuerlige registreringer fra en avløpsstasjon utrustet med limnigraf danne grunnlag for kalibrering av en hydrologisk modell for det aktuelle felt. Dette forutsetter at de registrerte nedbørforløp er representative for dette feltet. Som beskrevet i avsnitt 5.3.2. kan det i en slik modell ofte bestemmes en nedbørkorreksjon for å tilpasse volumene av de registrerte nedbørforløp, slik at også disse blir representative for det aktuelle felt.

Hvis det bare finnes nedbørstasjoner med manuelle observasjoner i rimelig nærhet av avløpsstasjonen, kan nedbørforløpet allikevel estimeres med finere tidsoppløsning ved hjelp av data fra en pluviografstasjon. Dataene fra hver stasjon summeres da fortløpende og de akkumulerte døgnverdiene tilpasses deretter den ønskede tidsoppløsningen med samme relative fordeling i tid som pluviografdataene.

3.2.2. Døgnlige data

Døgnverdier for nedbør og døgnmiddelverdier for temperatur kan brukes for å anslå snøsmelting under ekstrem nedbør ved at middeltemperaturer under situasjoner med meget stor nedbør studeres. For beregning av påregnelig maksimal flom velges den høyeste temperatur som har vært observert under stor nedbør i den aktuelle sesongen. Observerte temperaturer bør regnes om til å representere det aktuelle feltet, f.eks. ved faktoren $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pr 100 m høydeforskjell mellom feltets medianhøyde og nedbørstasjonenes høyde. Temperaturen multipliseres deretter med en grad-dagsfaktor, som velges utfra tabellen i avsnitt 5.2.5.

Det kan også være aktuelt å benytte temperaturdata fra radio-sondeoppstigninger ved vurderingen av de meteorologiske forhold i flomsituasjoner.

3.2.3. Ekstreme nedbørverdier

Ekstreme nedbørverdier, beregnes foreløpig av DNMI etter en metodikk beskrevet i [2]. Verdiene beregnes på grunnlag av opplysninger om det aktuelle felts beliggenhet, høydeintervall og eventuelt medianhøyde og normalavløp. De ekstreme nedbørverdiene oppgis for forskjellige varigheter og for forskjellige sesonger. Arealreduksjonsfaktorer, som er forskjellige for ulike varigheter, oppgis på grunnlag av feltets areal.

3.3. Hydrologiske data

3.3.1. Generelt

Aktuelle dataarkiver og -programmer ved Hydrologisk avdeling er beskrevet i [3]. Opplysninger om nylig utførte endringer eller tillegg kan fås ved henvendelse til avdelingen.

Ved flomberegninger skal data fra arkivet for kontrollerte og korrigerede data, F2, fortrinnsvis brukes. Videre må data fra uregulerte stasjoner eller uregulerte perioder benyttes. I [3] gis en oversikt over tilgjengelige data og opplysninger om reguleringer for Hydrologisk avdelings målestasjoner.

I regulerte felt kan uregulert tilsig beregnes ved å korrigere avløpet fra feltet for magasinering og eventuelle overføringer. For dette kreves vannstandsdata fra magasinene og opplysninger om overføringer inn i og ut av feltet. Tilsigsberegninger må alltid utføres slik at flomforløpene ikke dempes, dvs. de må utføres med usentrerte differenser (endringer over ett tidsskritt) av magasin vannstandene. Det advares mot ukritisk bruk av beregnede tilsigsdata, da ekstremverdier i slike dataserier er forholdsvis unøyaktige.

Beregnete tilsigsdata og observerte avløpsdata kan ikke uten videre kombineres til lengre dataserier, da også den naturlige selvreguleringen i innsjøer elimineres i tilsigsberegningen.

3.3.2. Kvalitetskontroll

Alle hydrologiske data som skal brukes i en flomberegning bør i prinsippet kontrolleres. Av praktiske grunner vil det imidlertid oftest ikke være hensiktsmessig å foreta tidkrevende kontroller av data fra mindre viktige sammenlikningsstasjoner.

Kvaliteten av vannføringskurven for sentrale avløpsstasjoner bør alltid vurderes. Hvis flomvannføringene hvert år faller langt ut på den ekstrapolerte delen av kurven, bør dataene tillegges mindre vekt.

Ekstreme flomvannstander, bør kontrolleres for mulige feilregistreringer. Dette gjelder også magasin vannstander som er blitt brukt ved tilsigsberegninger når disse fører til høye tilsigsflommer.

3.3.3. Observerte data

Grunnlaget for de fleste flomanalyser er vanligvis døgnlige middelveier for vannføring. De fleste hydrometriske målestasjonene ble utrustet med kontinuerlig registrerende utstyr først i 1960-70 årene. Særlig de lange observasjonsseriene inneholder derfor hovedsakelig manuelt avleste data en gang i døgnet. Disse data antas som regel å representere døgnmiddelveier, men kan i praksis være både høyere eller lavere enn den virkelige døgnmiddelvei. Videre er døgnmidler fra limnigrafregistreringer tatt ut for kalenderdøgn. Høyeste døgnerdi er derfor oftest noe lavere enn høyeste 24-timers middel.

Ved flomberegninger er det ofte ønskelig å kjenne kulminasjonsvannføringene som ofte vil være betydelig høyere enn døgnerdi. Foreligger limnigrafdata for deler av observasjonsperioden bør disse alltid brukes til å vurdere forholdet mellom døgnerdi og kulminasjonsverdi. Hvis aktuelle limnigrafdata ikke er digitalisert og lagt inn på Hydrologisk avdelings arkiv for data med fin tidsoppløsning (FINDA), bør dette gjøres. Sammenligningen bør ikke foretas på enkeltflommer, men på frekvensanalyser av kulminasjons- og døgnerdi.

Kortere dataserier kan forlenges ved bruk av regresjonsmodeller eller nedbør-avløpsmodeller. Det advares mot ukritisk bruk av slike dataserier. Spesielt må det legges vekt på beskrivelsen av flomforløpene ved kalibreringen av slike modeller.

I enkelte tilfeller kan det også forekomme enkeltobservasjoner av ekstreme flomvannstander eller flomvannføringer fra det aktuelle felt. På tross av at disse vanskelig lar seg knytte til bestemte gjentaksintervaller kan de ofte gi verdifulle tilleggssinformasjoner.

3.4. Feltparametre

Bruk av regionale flomformler og beregning av modellparametre i flommodellen krever at visse feltparametre bestemmes ut fra et godt kartgrunnlag, som beskrevet i [4] og [5]. Aktuelle feltparametre er:

Q_N :	midlere spesifikt årsavløp	[l/s km ²]
A :	nedbørfeltets areal	[km ²]
A_S :	sjøprosent	[%]
A_{SE} :	effektiv sjøprosent	[%]
A_{SF} :	snaufjellprosent	[%]
A_B :	breprosent	[%]
L_F :	feltaksens lengde	[km]
ΔH :	maksimal høydeforskjell	[m]
R_K :	midlere feltgradient	[m/km]
S_T :	hovedelvas gradient	[m/km]
H_L :	relieff-forholdet	[m/km]

For definisjon av disse feltparametrene henvises til [4].

4. BEREKNING AV DIMENSJONERENDE TILLØPSFLOM

4.1. Generell metodikk

Tilløpsflom med gjentaksintervall 1000 år for et uregulert felt kan beregnes ved to forskjellige metoder. Vanligvis baseres beregningen på frekvensanalyse av hydrologiske data. Ved en alternativ metode brukes en hydrologisk modell som ut fra et gitt nedbørforløp simulerer et flomforløp. Dersom datagrunnlaget er usikkert, anbefales det å bruke begge metodene og sammenligne resultatene, før den endelige fastsetting av dimensjonerende tilløpsflom.

Store og sammensatte felt medfører alltid spesielle problemer ved flomberegninger. Ved slike felt vil det være feil å kombinere en dimensjonerende avløpsflom fra et ovenforliggende magasin med dimensjonerende tilløpsflom fra lokalfeltet nedenfor. De kritiske flommene kan også være av forskjellig varighet ved ulike magasiner i samme vassdrag. Store ($>400 \text{ km}^2$) og sammensatte felt må derfor vurderes nøye og kan kreve flere beregninger, f.eks. en frittstående beregning for det øverste delfeltet/magasinet og en ny beregning for hele feltet, med de forutsetninger som er kritiske for det nedenforliggende magasinet. Slike beregninger er nærmere behandlet i kapittel 7.

4.2. Sesonginndeling

For store deler av landet skilles mellom to forskjellige typer flommer, vårflommer og høstflommer. Disse må derfor statistisk behandles adskilt.

Vårflommene er vesentlig forårsaket av snøsmelting, og de har relativt lang varighet og stort volum. Flomstørrelsene øker gjerne langsomt med økende gjentaksintervall.

Høstflommene er oftest kortvarige og er hovedsaklig forårsaket av nedbør med stor intensitet. Flomstørrelsene øker normalt relativt raskt med økende gjentaksintervall. Siden store høstflommer ikke er årvisse er det lett å undervurdere risikoen for høstflommer ut fra korte observasjonsserier.

Sesonginndelingen i vår- og høstflommer må velges ut fra feltets beliggenhet. I enkelte deler av landet f.eks. langs kysten, vil det være umulig å skille mellom de to flomtypene, slik at årsflommer må behandles. Sesonginndeling for flommer er behandlet i [4].

Ut fra observerte flommer i eller i nærheten av feltet kan det vurderes hvilke flommer som vil være mest kritiske. I tvils-tilfeller må både vår- og høstflommer beregnes. Ved vurdering av observerte flommer kan videre den flomskapende perioden fastlegges og derved hvilke ekstreme nedbørverdier som skal ligge til grunn for eventuell beregning ved en hydrologisk modell. Det vil f.eks. være feil å bruke ekstreme vinterverdier på nedbøren, dersom det er mest sannsynlig at nedbøren kommer i form av snø i store deler av feltet.

4.3. Flomvarighet

Avløpsflommens størrelse er selvsagt avhengig av tilløpsflommen, men også av flomdempningen i magasinet, dvs. av magasinets areal og flomavledningsorganenes karakteristikk og manøvrering. Dersom dempningen er ubetydelig vil avløpsflommen være lik tilløpsflommen. I denne situasjonen er det derfor nok å bestemme dimensjonerende tilløpsfloms kulminasjonsverdi.

Vanligvis gir likevel magasinet en viss flomdempning, og det får mer tid til å reagere dess lengre tilløpsflommen varer, dvs. dess større volum tilløpsflommen har. Imidlertid avtar midlere intensitet på tilløpsflommen med økende varighet for et gitt gjentakintervall, og det eksisterer derfor en kombinasjon av volum og maksimal intensitet som gir størst avløpsflom. Den tilsvarende varigheten har vi valgt å kalle den kritiske varigheten for magasinet, T_M .

Det er tilløpsflommens volum eller middelintensitet over magasinets kritiske varighet som det er mest viktig å få bestemt så godt som mulig. For lengre varigheter er middelintensiteten på avløpsflommen avtagende, for kortere varigheter blir variasjonene dempet ut i magasinet. Er den kritiske varigheten større enn ett døgn, har kulminasjonsverdien på tilløpsflommen svært liten innflytelse på avløpsflommen, og vi kan legge mindre vekt på å bestemme tilløpsflommens kulminasjon.

Kritisk varighet kan bestemmes ved prøving og feiling, dvs. ved å rute flommer med forskjellig varighet og altså derved forskjellig middelvannføring gjennom magasinet. Den varighet som gir høyest avløpsflom velges og danner grunnlag for videre beregninger. Prinsippet ved en slik fremgangsmåte er vist i figur 1.

For magasiner med fast overløp kan kritisk varighet finnes tilnærmet ved følgende formel:

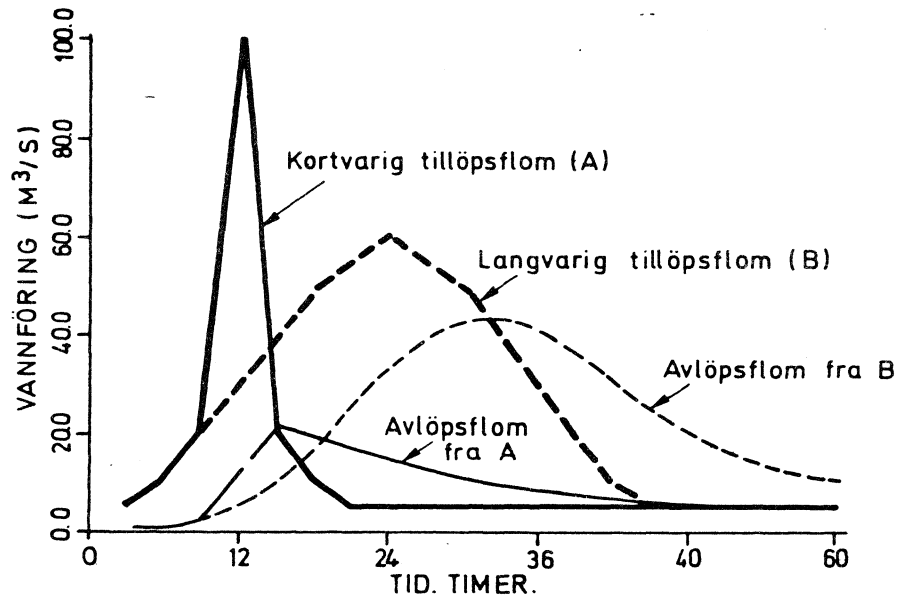
$$T_M = 480 \cdot A_M \cdot Q_i^{-1/3} \cdot (C \cdot B)^{-2/3} \quad (\text{timer})$$

hvor A_M er magasinets areal ved HRV uttrykt i km^2 , B er det faste flomløpets lengde i m og C er overløpskoeffisienten, vanligvis nær 2. Q_i er tilløpsflom i m^3/s , midlet over T_M . Som vi ser er T_M relativt lite følsom for variasjonen i Q_i . I praksis kan vi derfor benytte samme kritiske varighet for dimensjonerende flom og påregnelig maksimal flom. Q_i kan som regel settes til fire ganger midlere årsflom over ett døgn.

Formelen over er framkommet ved å betrakte et magasin med initialvannstand på HRV og med fast overløp og en tilløpsflom med konstant intensitet. T_M defineres av det tidspunkt hvor avløpsflommen har nådd opp i 80% av tilløpsflommens intensitet.

4.4. Beregning av tilløpsflommens størrelse og forløp

Den anbefalte metoden for beregning av flomstørrelser med gitte gjentakintervall er frekvensanalyse av observerte flomdata. Det statistiske grunnlaget og metodikken for frekvensanalyser er



Figur 1. Eksempel på ruting av en kortvarig tilløpsflom med høy kulminasjonsvannføring og en langvarig tilløpsflom med lavere kulminasjonsvannføring.

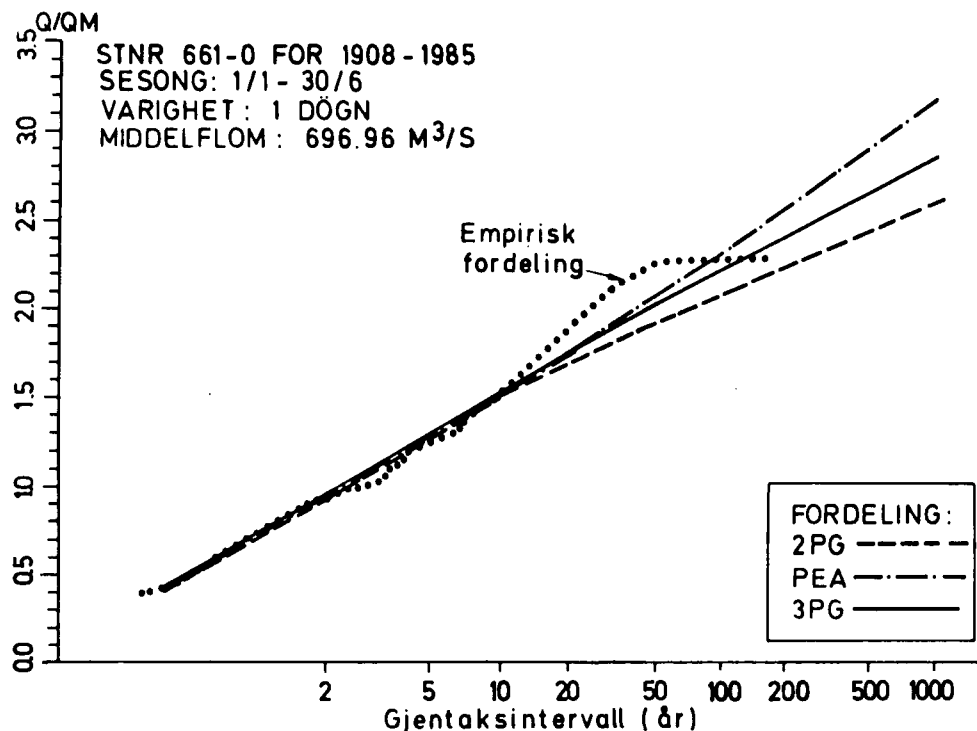
Det større volumet i den langvarige tilløpsflommen gir utslag med en ca. dobbelt så høy kulminasjonsvannføring i avløpet som for den kortvarige tilløpsflommen, på tross av at den senere har ca. dobbelt så stor kulminasjonsvannføring i tilløpet.

beskrevet i [4]. En slik analyse gir middelflommen (Q_M) for en gitt varighet, og forholdstallet mellom flom med 1000 års gjentakelsesintervall (Q_{1000}) og middelflommen for samme varighet. Et eksempel på en flomfrekvensanalyse er vist i figur 2.

Dersom flomfrekvensanalysen er basert på avløpsdata fra før reguleringen kan det være nødvendig å korrigere for tappt selvregulering i senere neddemte sjøer.

Bruken av flomfrekvensanalyse og eventuelt andre beregningsmetoder er avhengig av de aktuelle dataserienes lengde:

- >50 år: Q_M beregnes fra observert serie og Q_{1000}/Q_M fra to- eller treparameterfordelinger.
- 30-50 år: Q_M beregnes fra observert serie og Q_{1000}/Q_M fra to-parameterfordelinger.
- 10-30 år: Q_M beregnes fra observert serie og Q_{1000}/Q_M ved analyse av andre lengre serier i området, eventuelt ved utvidelse av serien ved modellsimuleringer.
- <10 år: Q_M beregnes ved korrelasjon mot andre serier og/eller fra flomformler i [4]. Q_{1000}/Q_M beregnes ved analyse av andre lengre serier i området, eventuelt ved utvidelse av serien ved modellsimuleringer.



Figur 2. Eksempel på flomfrekvensanalyse.

Det er prøvd tilpasset tre teoretiske fordelinger til den empiriske fordelingen som er vist med stiplet linje.

Hvis data ikke foreligger, beregnes Q_M ved sammenligning med Q_M -verdier for nærliggende felter og/eller fra flomformler i [4]. Q_{1000}/Q_M bestemmes ut fra verdier fra nærliggende felter. Område- og regionkurvene i [4] kan også være en støtte, men det advares mot ukritisk bruk av disse.

Flomformlene, hentet fra [4] er gjengitt på side 13 og gir som resultat en døgnmiddelverdi. For bestemmelse av feltets region- og områdetilhørighet vises også til [4].

Flomformlene gjelder for felter $>50 \text{ km}^2$, men bør brukes forsiktig for felter $<100 \text{ km}^2$. Videre må ikke sjøarealet for magasinet som beregningen utføres for regnes med, ettersom tilløpsflommen skal beregnes. Hvis imidlertid A_S eller A_{Sg} da blir nær null vil resultatet bli meget usikkert, ettersom flomformlene i de fleste tilfeller ikke er utledet med data fra slike felter.

Flomfrekvensanalyser må vurderes nøye, særlig hvis det forekommer meget store flomverdier i dataserien, som kan antas å ha et vesentlig større gjentaksintervall enn seriens lengde. Fastsettelse av forholdet Q_{1000}/Q_M baseres på frekvensanalyse både med og uten de ekstreme verdiene.

Ved beregning av Q_M og forholdet Q_{1000}/Q_M er det viktig å bruke alle tilgjengelige metoder. En bør derfor sammenligne resultatene fra flomfrekvensanalyser med forskjellige fordelinger, verdier fra flomformler og område/regionkurver samt analyser for nærliggende stasjoner.

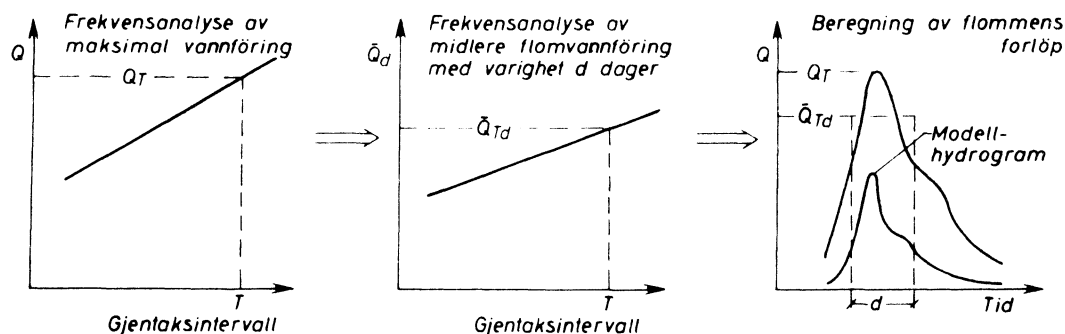
Formler for beregning av middelfløm (enhet l/s·km²):

Innlandsregionen. Vårflommer.	
Område V1 :	$QM=46.1 \cdot S_T^{0.351} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.103} \cdot (A_{SF}+1)^{0.140} \cdot \Delta H^{-0.172} \cdot Q_N^{0.312}$
" V2 :	$QM=51.5 \cdot Q_N^{0.451} \cdot L_F^{-0.223} \cdot (A_{SF}+1)^{0.197} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.107}$
" V3 :	$QM=14.0 \cdot Q_N^{0.576} \cdot (A_{SF}+1)^{0.350} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.117} \cdot (A/L_F)^{-0.239}$
Innlandsregionen. Høstflommer.	
Område H1 :	$QM=5.62 \cdot Q_N^{0.896} \cdot R_K^{0.469} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.188} \cdot (A/L_F)^{-0.374}$
" H2 :	$QM=0.844 \cdot Q_N^{1.405} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.086}$
" H3 :	$QM=2.07 \cdot Q_N^{1.378} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.162} \cdot (A/L_F)^{-0.204}$
" H4 :	$QM=2.16 \cdot Q_N^{1.320} \cdot (A_{SE}+0.01)^{-0.147} \cdot L_F^{-0.197}$
" H5 :	$QM=2.16 \cdot Q_N^{0.664} \cdot R_K^{0.410}$
Kystregionen. Årsflommer.	
Område Å1 :	$QM=14.4 \cdot Q_N^{1.157} \cdot (A_S+1)^{-0.717}$
" Å2 :	$QM=15.4 \cdot Q_N^{1.195} \cdot (A_S+1)^{-0.646}$
Brefelt. Årsflommer.	
ÅBRE :	$QM=226 \cdot L_F^{-0.423} \cdot Q_N^{0.522} \cdot A_B^{-0.011}$

Hvis midlere fløm og dimensjonerende fløm er beregnet som døgn-middelverdier må også kulminasjonsverdiene estimeres. Jo mindre magasinet er jo større betydning får kulminasjonsvannføringen for avløpsflommen.

Flømvolumet beregnes ut fra frekvensanalyser på flommer med forskjellig varighet. Ved å kombinere Q1000-verdier for forskjellige varigheter vil imidlertid den kombinerte flommen få et gjentakintervall som er større enn 1000 år. For varigheter opp til 2-3 døgn vil denne feilen ikke bli stor, men for lengre varigheter må flømvolumet vurderes nøye. I slike tilfeller skal Q1000-verdien for den kritiske flømvarigheten danne grunnlag for flømforløpet og verdiene for øvrige varigheter må være lavere enn tilsvarende Q1000-verdier.

Flømforløpet bør bestemmes fra et modellhydrogram, basert på en eller flere av de største observerte flommene. Modellhydrogrammet oppskaleres som regel først til beregnet Q1000-verdi for den kritiske flømvarigheten og tidsaksen justeres deretter slik at hele flømvolumet overensstemmer med den tidligere beregnede verdi (se figur 3).



Figur 3. Konstruksjon av flomforløp ved hjelp av modellhydrogrammer.

En alternativ metode for å beregne en tilløpsfloms størrelse og forløp er å bruke en nedbør-avløpsmodell. Q_{1000} simuleres da på grunnlag av et nedbørforløp med 1000 års gjentaksintervall (P_{1000}) ved hjelp av f.eks. flommodellen, beskrevet i avsnitt 5.3.2. Et problem ved slike beregninger er imidlertid at sannsynligheten til flommen ofte endres. Det er nemlig ikke sikkert at P_{1000} gir Q_{1000} . Nedbøren kan f.eks. komme som snø, eller den kan komme på sterkt uttørket felt, som gir redusert avløp. På den andre siden kan den også tenkes å være kombinert med snøsmelting. Det er vanskelig å veie disse sannsynlighetene mot hverandre. Metoden egner seg best for felt der regnflommer er dimensjonerende. Man ser da bort fra snøsmelting og regner feltet som mettet ved nedbørens start.

4.5. Trinn i beregningen

Beregning av dimensjonerende tilløpsflom foregår vanligvis i følgende trinn:

- Flomskapende perioder defineres (sesonginndeling).
- Det velges hvilke avløpsstasjoner i eller i nærheten av feltet som skal benyttes til flomfrekvensanalyser.
- Datagrunnlaget tilrettelegges, f.eks. ved utvidelse av observasjonsserier, tilsigsberegninger m.m., og kvalitetsvurderes.
- Flomfrekvensanalyser utføres for de aktuelle sesonger og varighet 1 døgn. Eventuelt foretas også beregninger med regionale flomformler.
- Forholdet mellom kulminasjonsvannføringer og døgnmiddelvannføringer bestemmes.
- Kritisk varighet for flomforløpet bestemmes.
- Flomvolumet bestemmes ved flomfrekvensanalyse for kritisk varighet.

- *Flomforløpet konstrueres ved bruk av modellhydrogram, symmetrisk eller ved bruk av andre metoder.*
- *Eventuelt brukes også modellmetoden, hvor flomforløpet beregnes ut fra et nedbørforløp, slik at resultatene kan sammenlignes.*

5. BEREGNING AV PÅREGNELIG MAKSIMAL TILLØPSFLOM

5.1. Generell metodikk

Tidlig i dette århundret ble vurderingen av dammers sikkerhet mot brudd som følge av overtopping stort sett basert på de høyeste observerte flommer eller empiriske formler basert på omhylningskurver med et mer eller mindre tilfeldig påslag for ekstra sikkerhet. Det er også benyttet frekvensanalyse hvor flommer med meget store gjentakintervall, f.eks. 10 000 år, er lagt til grunn for sikkerhetsvurderinger. Det har imidlertid vist seg at dette er usikre metoder for å fastsette verdier som skal knyttes til vurdering av dammers sikkerhet mot alvorlige ulykker eller brudd.

I dag brukes internasjonalt ofte begrepet påregnelig maksimal flom (PMF) for vurdering av dammers sikkerhet. PMF beregnes vanligvis ut fra verdier for påregnelig maksimal nedbør (PMP) pluss et eventuelt tillegg for snøsmelting. PMP kan imidlertid estimeres på to ulike måter – enten ved en maksimering av de forhold som er avgjørende for nedbørutløsningen i atmosfæren [6] eller ved en statistisk analyse av observerte nedbørdata [7].

I Norge er det foreløpig valgt å bruke den statistiske metoden ved beregninger av PMP. DNMI har tilpasset denne metoden til norske forhold [2]. PMP beregnes av DNMI for ulike sesonger og varigheter som punktverdier. Disse tilpasses det enkelte felt ved en arealreduksjon.

DNMI arbeider for tiden med prosjekter for beregning av PMP ved nedbørmaksimering og fastsettelse av arealreduksjon for store felter.

Metoden for å beregne PMF går kortfattet ut på at det ut fra de gitte PMP-estimerer konstrueres et nedbørforløp, som eventuelt kombinert med et snøsmelteforløp, brukes for å simulere PMF fra det uregulerte felt ved en nedbør- avløpsmodell.

Spesielle problemer knyttet til store og sammensatte felt er diskutert i kapittel 7.

5.2. Nedbør/snøsmelting

Vurderingen av nedbør- og eventuelt snøsmelteforløp som inngangsdata til en nedbør-avløpsmodell foregår i flere trinn.

Først og fremst må de flomskapende periodene fastlegges og kritisk varighet på nedbørforløpet bestemmes ut fra egenskapene ved feltet og magasinet. Deretter må nedbørverdiene (PMP) arealreduseres og fordeles i tid. Hvis nedbøren skal kombineres med snøsmelting vil det også være nødvendig å bestemme temperaturforhold, smelteintensiteten og snømagasinets størrelse.

5.2.1. Sesonginndeling

PMP-verdier beregnes av DNMI for hele året og for definerte sesonger. Vi kan ikke i alle tilfeller regne med at all den nedbøren som representeres av en PMP-verdi faller som regn. Det bør derfor defineres flomskapende perioder hvor vi utelater den del av vinteren da nedbøren faller som snø. PMP kan da opptre i følgende situasjoner:

- I en vårflomsituasjon med snøsmelting fra et stort snømagasin. Det må da tas hensyn til snøsmelting før, under og etter selve nedbørforløpet.
- I en sommersituasjon uten snøsmelting.
- I en høstsituasjon med eventuelt snøsmelting fra et lite snømagasin. Det bør da regnes med snøsmelting kun under selve nedbørforløpet.

Opplysninger om den normale perioden for snødekke i et felt kan fåes fra DNMI, og vil danne grunnlag for vurdering av eventuell snøsmelting under flom.

For høyfjellsfelter vil det vanligvis være av interesse å vurdere en vårsituasjon og en høstsituasjon. I beregninger for lavlandsfelter ved kysten må i mange tilfeller årsverdiene av PMP anvendes. Spesielt på Vestlandet er imidlertid de største nedbørdata observert sent på høsten eller tidlig på vinteren. Disse observasjonene, som kan inkludere nedbør i form av snø, vil bidra til relativt høye årsverdier av PMP. Det er i slike tilfeller ekstra viktig at den flomskapende perioden bestemmes, f.eks. ut fra observerte flommer i det aktuelle feltet eller nabofelter. Verdifull informasjon kan også hentes fra DNMI's dataserier, hvor det angis om nedbøren er falt som regn eller snø. De sesongverdier som er mest kritiske for dammen velges som grunnlag ved beregning av PMP. Ved tvilstilfeller beregnes flere alternativer.

For bredominerte felter kan en vanligvis regne med at de største flommene opptrer om sommeren eller tidlig om høsten. Det må da alltid tas hensyn til bresmelting.

5.2.2. Varighet

PMP-verdier beregnes av DNMI for forskjellige varigheter. Hvor lang varighet vi legger inn i PMP-forløpet er avgjørende for flomvolumet og dermed også for den maksimale flomvannføringen fra

store magasiner. For slike magasiner vil korte varigheter gi stor flomdempning og lange varigheter gi redusert flomdempning. Nedbørens kritiske varighet (D) er avhengig av feltets reaksjonstid (T_F) og magasinetts kritiske varighet (T_M). Vi betrakter altså en nedbørvarighet

$$D = T_F + T_M$$

T_F (vannets transporttid fra øverste del av feltet til utløp), kan vanligvis settes til $1/K_2$, der K_2 er nedre tømme konstant i flommodellen, som beskrevet i avsnitt 5.3.2. T_M beregnes som beskrevet i avsnitt 4.3. Total varighet av nedbøren bør være minst 1,5 ganger den kritiske varigheten.

5.2.3. Arealreduksjon

De PMP-verdier som oppgis av DNMI er normalt punktverdier og skal reduseres til arealverdier. Reduksjonen skal utføres for alle varigheter, men med forskjellige reduksjonsfaktorer. For felter mindre enn ca. 400 km² anvendes de reduksjonsfaktorer som oppgis av DNMI og stort sett er hentet fra britiske undersøkelser [7, 8]. For større felter bør arealreduksjonene baseres på observerte nedbørforløp for det aktuelle felt eller sammenlignbare områder. Alternativt kan "storm-sentrerte" arealreduksjonsfaktorer, f.eks. hentet fra [8], brukes for felter større enn 400 km². Dette arbeidet må utføres av eller i nært samarbeide med DNMI.

Problemet med å bestemme arealreduksjoner for store felter er under utredning av DNMI med siktemål å fastlegge retninglinjer for dette formål.

5.2.4. Fordeling i tid

Det anbefales en tilnærmet symmetrisk fordeling omkring høyeste nedbørintensitet dersom kritisk varighet er mindre enn eller lik 2 døgn [6]. Dersom den kritiske varigheten er mer enn to døgn, vil nedbøren normalt stamme fra flere frontpassasjer, med lite eller ingen nedbør mellom episodene. Å anta et symmetrisk forløp vil da være helt urealistisk. I stedet benyttes et observert forløp med hovedtyngden av nedbøren sist i perioden. Dette forløpet skaleres opp til PMP for kritisk varighet. Det må påses at PMP-verdiene for øvrige varigheter ikke overskrides.

5.2.5. Snøsmelting

Snøsmelting (S) kan beregnes ut fra en grad-dagsfaktor (C_S) og et maksimalt estimat av lufttemperaturen (T_L):

$$S = C_S \cdot T_L \quad (\text{mm/døgn})$$

Følgende erfaringstall for C_S (mm/°C · døgn) brukes dersom C_S ikke kan fastsettes ved kalibrering av flommodellen:

	Tett skog	Noe skog	Snaufjell	Bre
Perioder uten nedbør	1,5	2,0	2,5	3,5
Perioder med nedbør	3,0	4,0	5,0	7,0

Valg av temperaturverdier utføres separat for vårflommer og høstflommer. En vårflom antas å begynne ved den seneste observerte dato for vårflommer i feltet og temperaturen fastsettes på grunnlag av de høyeste observerte temperaturer, dels i situasjoner uten nedbør og dels i situasjoner med stor nedbør, i den aktuelle sesongen.

For en høstflom regnes det med snøsmelting kun under selve nedbørforløpet og temperaturen fastsettes på grunnlag av de høyeste observerte temperaturer under ekstreme nedbørsituasjoner for den del av høsten da det kan antas å være snødekke i feltet. Oftest finnes det imidlertid ikke data for det aktuelle feltet og en må da bruke observasjoner fra nærliggende stasjoner. Temperaturverdier skal korrigeres til feltets medianhøyde, f.eks. som beskrevet i avsnitt 3.2.2.

For små felter vil det være aktuelt å ta hensyn til temperaturens døgnvariasjon, når denne kan gi signifikante utslag i avløpsvariasjoner fra magasinet.

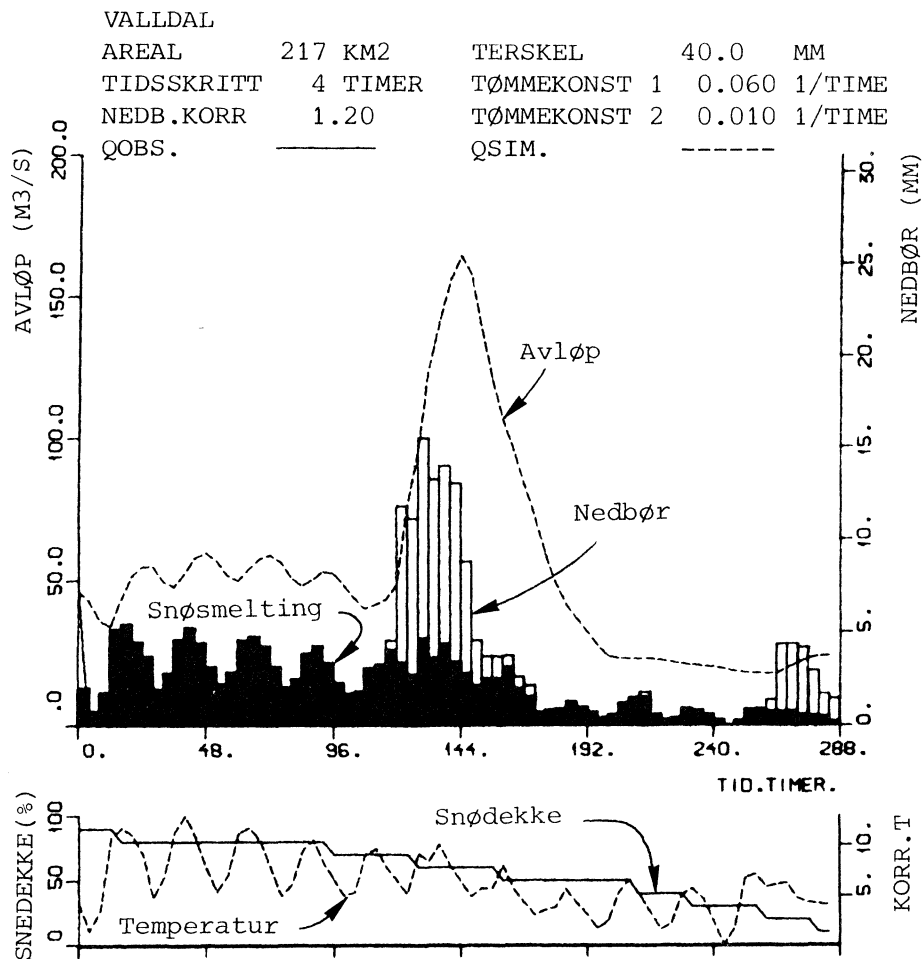
5.2.6. Kombinert snøsmelting-nedbørforløp

For en vårflomsituasjon må det regnes med snøsmelting forut for selve nedbørforløpet. Denne snøsmeltingen kan medføre en relativt høy vannføring før den ekstreme nedbøren begynner. Det er nærmest umulig å fastsette denne startvannføringen og samtidig gi et fornuftig estimat på snøens restmagasin. Hele vårflomperioden bør derfor simuleres med en nedbør-avløpsmodell.

Ved en slik simulering skal snømagasinet ved snøsmeltingens begynnelse settes lik det høyest observerte snømagasinet i området, og ha et gjentaksintervall på minst 30 år. Dersom det er sparsomt med snømålinger for det aktuelle feltet eller for sammenlignbare områder, kan snømagasinet beregnes av en hydrologisk modell ut fra historiske nedbør- og temperaturserier. Snøsmeltingen skal også antas å begynne ved den senest observerte dato for vårflommens begynnelse i feltet og temperaturforløpet velges som det høyeste observerte enkeltforløp i en 30-50 års periode fram til ett døgn før nedbøren setter inn, da temperaturen senkes til den høyeste observerte under store nedbørsituasjoner.

Nedbørforløpet i en slik simulering legges inn på det tidspunkt som gir mest ugunstig flomforløp for magasinet. Dette vil vanlig-

vis være når snøsmeltingen fra feltet kulminerer. Et eksempel på en slik modellsimulering er vist i figur 4.



Figur 4. Eksempel på simulering med flommodellen.

I eksemplet er det simulert en periode med snøsmelting før en ekstrem nedbørsituasjon.

Ved slike simuleringer av hele vårflomforløp bør det i samråd med Vassdragsdirektoratet vurderes om initialinnhold i magasiner kan settes lavere enn HRV.

For en høstsituasjon regnes det eventuelt med snøsmelting bare under selve nedbørforløpet som omtalt i forrige avsnitt (5.2.5.)

Svært ofte er datamaterialet for de aktuelle felter mangelfullt. Det vil derfor ikke være mulig å unngå at man må gjøre skjønnsmessige vurderinger. En viss grad av skjønn om hva som er en realiserbar situasjon må f.eks. alltid komme inn. For PMF-beregninger er det viktig at bare nedbøren maksimeres (PMP) mens andre meteorologiske og hydrologiske forhold holdes på et ugunstig nivå.

5.3. Nedbør-avløpsmodeller

5.3.1. Generelt

Hensikten med en nedbør-avløpsmodell er at det fastlagte nedbør-forløpet, og eventuelt snøsmelteforløpet, skal omregnes til vannføring, dvs. flom i et gitt felt. Resultatet av denne modell-simuleringen vil da være en uregulert tilløpsflom til magasinet, enten fra totalfeltet eller et restfelt nedenfor et ovenforliggende magasin.

Det er flere typer nedbør-avløpsmodeller som kan brukes for det aktuelle formål. Blant de enklere er enhetshydrogrammet og blant de mer kompliserte er begrepsmessige feltmodeller som HBV-modellen.

5.3.2. Flommodellen

En hydrologisk modell for flomberegninger er blitt utviklet ved Hydrologisk avdeling [5].

Hensikten med utviklingen av denne modellen har vært å gi en best mulig dynamisk beskrivelse av flomforløpet uten at antallet modellparametre blir altfor stort.

Modellen er i utgangspunktet et lineært kar, dvs. en forsinkelsesmekanisme der avløpet er proporsjonalt med innholdet. En slik modell gir eksponentielt avtakende avløp i nedbørfrie perioder. For å få en mer dynamisk reaksjon på store nedbørmengder er det imidlertid innført en "åpning i veggen" på karet, slik at reaksjonen blir sterkere når innholdet kommer over et visst nivå (se figur 5). Modellen får dermed følgende tre parametre:

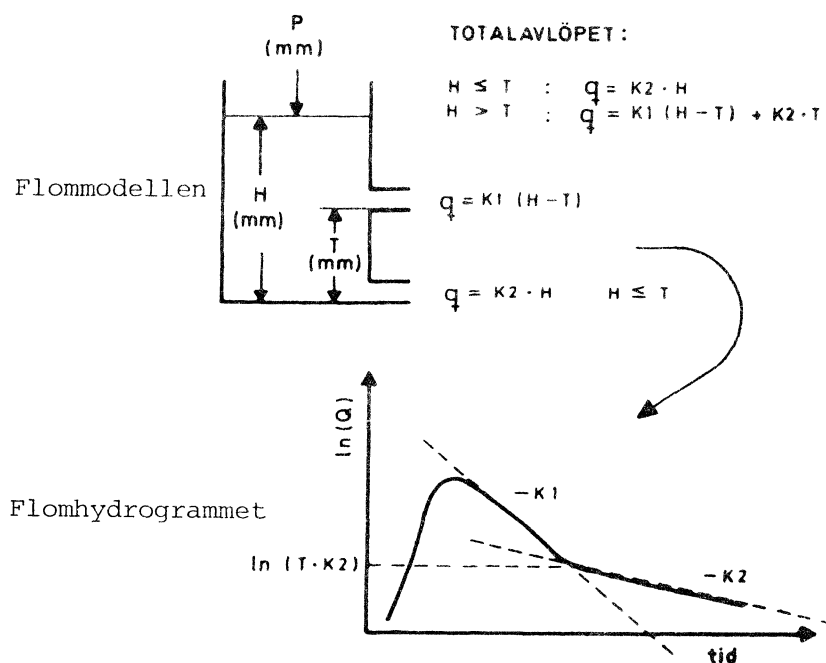
K_1 = tømmekonstant for øvre nivå (tid^{-1}).

K_2 = tømmekonstant for nedre nivå (tid^{-1}).

T = skille mellom øvre og nedre nivå (mm).

Modellen har en snørutine tilsvarende den som finnes i HBV-modellen, og den kan derfor også simulere sammensatte regn- og smelteflommer. Videre har modellen en markvannsdelt slik at ulike initialtilstander i feltet kan velges. Dette er nødvendig bl.a. ved simulering av hele vårflomforløp. Kortvarigere flomforløp om sommeren eller høsten skal imidlertid alltid forutsettes å inntreffe for vannmettede felter.

Modellen har også en grunnvannsdelt som bl.a. tar hensyn til varierende sjøprosent i felter før og etter regulering. Til sist er modellen utstyrt med en enkel ruting som kan ta vare på forsinkelser i feltet. Dette betyr at flommodellen i praksis er blitt nær identisk med HBV-modellen, men parameterestimeringen er vesentlig forenklet.



Figur 5. Skisse av flommodellen og et simulert flomforløp.

Modellparametrene beregnes enten ut fra ligninger, basert på feltparametrer, eller ved kalibrering mot observerte flommer. Kalibrering forutsetter at det finnes nedbør- og avløpsdata med tilstrekkelig fin tidsoppløsning for feltet. Det anbefales at parameterverdier beregnet ut fra ligningene blir brukt som første estimat ved kalibrering. Likningene for modellparametrene, utledet i [5], er:

$$K_1 = 0.0135 + 0.00268 \cdot H_L - 0.01665 \cdot \ln(A_{SE})$$

$$K_2 = 0.009 + 0.21 \cdot K_1 - 0.00021 \cdot H_L$$

$$T = -9.0 + 4.4 \cdot K_1^{-0.6} + 0.28 \cdot Q_N$$

Når effektive sjøprosenten er null settes $A_{SE} = 0.001$.

Modellparametrene er sterkt avhengige av effektiv sjøprosent. Det er derfor svært viktig at man ikke tar med innsjøer som vil inngå i magasinet ved beregning av effektiv sjøprosent for feltet, da selvreguleringen i slike sjøer ikke vil påvirke tilløpsflommen.

En viktig bemerkning vedrørende denne modellen er at det ved kalibrering kan brukes en nedbørkorreksjon for å få samsvar mellom nedbør- og avløpsvolumene under flommen. Ved simulering av PMP skal korreksjonsfaktoren settes til 1 (ingen korreksjon) da PMP-verdiene fra DNMI vil være gitt som en representativ verdi for feltet.

I [5] gis retningslinjer for beregning av parameterverdier og eksempler på bruk av modellen. Da kalibrering mot observerte flommer krever god erfaring med bruk av slike modeller bør den utføres i nært samarbeid med Hydrologisk avdeling.

5.4. Simulering av påregnelig maksimal tilløpsflom

Påregnelig maksimal tilløpsflom simuleres ut fra det beregnede nedbør- snøsmelteforløpet og de beregnede/kalibrerte modellparametrene, ved bruk av flomprogrammet PQRUT. Initialvannføringen må oppgis og bør velges som middelvannføringen i den aktuelle sesongen. For ytterligere informasjon vises til programbeskrivelsen for PQRUT, som finnes ved Hydrologisk avdeling.

Da PMF beregnes med en metode er en sammenligning av resultater fra forskjellige beregninger ikke mulig. Resultatene bør imidlertid alltid vurderes mot PMF-verdier beregnet for andre felter i nærheten. En PMF-verdi er videre vanligvis 1,5-3,0 ganger høyere enn 1000-årsflommen for et felt.

En anerkjent metode for å vurdere rimeligheten av en PMF-verdi forutsetter at en har observerte flomdata for feltet eller et sammenlignbart felt. Metoden går ut på at middelflommen (QM) og standardavviket hos flommene (SQ) beregnes. Deretter beregnes en frekvensfaktor K:

$$K = (PMF - QM) / SQ$$

Verdien på K ligger vanligvis i området 12-15.

5.5 Trinn i beregningen

Beregning av påregnelig maksimal tilløpsflom foregår vanligvis i følgende trinn:

- *Flomskapende perioder defineres.*
- *PMP-estimer for tilsvarende sesonginnndeling beregnes av DNMI.*
- *Kritisk varighet på nedbørforløpet bestemmes.*
- *PMP-estimatene for aktuelle sesonger og varigheter arealreduseres.*
- *Ett eller flere tidsforløp for de gitte PMP-verdiene velges.*
- *For vårflommer bestemmes tidspunkt for begynnelse av smelting og størrelse av snømagasin.*
- *Smelteintensiteten (grad-dagsfaktoren) og temperaturforholdene under smelting med og uten nedbør bestemmes.*
- *Smelteforløp og nedbørforløp kombineres på ugunstig måte.*

- *Initialbetingelser i felt og magasin velges.*
- *Parameterverdier for flommodellen bestemmes ut fra feltegenskaper.*
- *Flommodellen kalibreres hvis mulig med observerte nedbør-, temperatur- og avløpsdata for noen store flommer.*
- *PMF simuleres ved hjelp av et eller flere konstruerte PMP-forløp.*
- *PMF-verdiene vurderes kritisk, og resultatet fastsettes.*

6. BEREGNING AV FLOMVANNSTAND OG AVLØPSFLOM

6.1. Generelt

Forutsetningene vedrørende overføringer og avløpsorganenes manøvrering skal som påpekt i kapittel 2 være avklart i samråd med Vassdragsdirektoratet.

Vannstanden ved flommens begynnelse skal være høyeste regulerte vannstand (HRV), dersom ikke annet er spesielt fastsatt.

6.2. Ruting gjennom ett magasin

Dersom magasinets flondempende virkning er neglisjerbar, blir avløpsflommen lik tilløpsflommen.

Dersom magasinets flondempende virkning er av betydning, bestemmes avløpsflommen av tilløpsflommens størrelse og forløp, vannstanden i magasinet ved flommens begynnelse, magasinets areal og avløpsorganenes karakteristikk og manøvrering. Beregningen utføres ved ruting av tilløpsflommen gjennom magasinet.

Magasinstørrelsen beskrives av magasinvolumet angitt for to eller flere vannstander, fortrinnsvis HRV og en eller flere høyere vannstander. Avløpsorganenes karakteristikk beskrives av en avløpskurve.

Tilløpsflommens forløp oppgis som vannføring for hvert tids-skritt. Ved rutingen beregnes magasinforandringen, resulterende vannstand og avløpsflommens størrelse for hvert tidsskritt.

Rutingen kan foretas ved hjelp av flomprogrammet PQRUT.

6.3. Ruting gjennom flere magasiner

Hvis det er flere magasiner i et vassdrag, er i prinsippet til-

løpsflommen til et magasin lik tilløpsflommen fra lokalfeltet, tillegg avløpsflom fra ovenforliggende magasin og eventuelle overføringer. Problemet ved sammensatte felt er å kombinere disse flommene på riktig måte, uten å forandre sannsynligheten på flommen eller å under- eller overestimere påregnelig maksimal flom. Sistnevnte er særlig knyttet til bruken av arealreduksjonsfaktorene.

I felt med magasiner av forskjellig størrelse og med forskjellig kritisk varighet vil det også være et problem å kombinere lokal tilløpsflom og avløpsflom fra ovenforliggende magasin på riktig måte.

Flomberegning i felt med flere magasiner er diskutert i kapittel 7.

6.4. Trinn i beregningen

Beregning av flomvannstand og avløpsflom foregår i følgende trinn:

- *Forutsetningene vedrørende overføringer, avløpsorganer og initialvannstander avklares.*
- *Magasintabell og avløpskurve bestemmes.*
- *Tilløpsflommen rutes gjennom magasinet.*
- *Tilløpsflommen til et nedenforliggende magasin beregnes ut fra tilløpsflommen i lokalfeltet og avløpsflommen fra ovenforliggende magasin, og rutes gjennom magasinet.*

7. FLOMBEREGNING I SAMMENSATTE FELT

7.1. Generelt

Flomberegninger i sammensatte felt, dvs. felt med flere magasiner, er betydelig mer komplisert enn beregninger for et enkelt magasin, og vil alltid medføre flere skjønnsmessige vurderinger.

De øverste magasinene vil ikke by på spesielle problemer, men behandles som enkeltmagasin etter de retningslinjer som er gitt foran. Nedenforliggende magasin derimot kan kreve mer omfattende behandling både når det gjelder beregning av dimensjonerende og påregnelig maksimal flom.

Hovedprinsippet vil være at tilløpsflommen beregnes for totalfeltet ned til det magasinet som betraktes. Denne tilløpsflommen fordeles på delfeltene til magasinene, og rutes så gjennom magasiner og vannveier.

Forutsetningene for ruting av flommen gjennom vassdraget vil

vanligvis være de samme som for et enkelt magasin, dvs. magasinenes startvannstander lik HRV, overføringer inn i totalfeltet åpne og ut av totalfeltet stengte. Man skal likevel være oppmerksom på at overføringer innen vassdraget kan bli vurdert forskjellig avhengig av hvilket magasin man betrakter. For et magasin kan det være ugunstig at en overføring er åpen, mens det for et annet magasin kan være ugunstig at den samme overføringen er stengt. Slike forutsetninger må avklares med Vassdragsdirektoratet.

Det er ofte av betydning å ta hensyn til forsinkelsen i vassdraget mellom magasinene. Denne transporteffekten kan enten beskrives som en konstant tidsforsinkelse eller ved en ruting-metode som tar hensyn til at vannhastigheten endres og at vann magasineres i oversvømmelseområder i vassdraget. Av slike rutingmetoder er det vanlig å benytte såkalt "hydrologisk" ruting (Muskingums metode) eller hydraulisk ruting (dynamisk flombølge). Ofte vil bruk av en konstant tidsforsinkelse være tilstrekkelig, fordi magasineringseffekten i elvestrekningene vanligvis er neglisjerbar ved de store flomvolumene det her er tale om. Slike tidsforsinkelser og Muskingum-ruting kan utføres ved hjelp av flomprogrammet PQRUT.

Beregningene foregår ved at man ruter tilløpsflommen gjennom øverste magasin, forskyver avløpsflommen med transporttiden i vassdraget til neste magasin, legger til lokal tilløpsflom (uten tidsforsinkelse) og eventuelle overføringer, og ruter den totale tilløpsflommen gjennom neste magasin. På samme måte rutes avløpsflommen videre nedover i vassdraget til nederste magasin som vi skal utføre beregningene for.

7.2 Dimensjonerende tilløpsflom

Beegning av dimensjonerende flom (Q_{1000}) for sammensatte felt ved flomfrekvensanalyse byr på problemer, først og fremst fordi man mangler et teoretisk grunnlag for beskrivelse av romvariasjonen til flommer med gitte gjentakintervaller. Som regel må man derfor basere beregningene på en flomfrekvensanalyse av uregulert tilsig fra totalfeltet og konstruere et flomforløp som inneholder Q_{1000} for den kritiske varigheten til nederste magasin. Denne flommen fordeles deretter på delfeltene, f.eks. etter middelavløp, og delflommene rutes gjennom magasiner og elveløp frem til nederste magasin. Disse beregningene gir Q_{1000} bare for nederste magasin.

Det er viktig at Q_{1000} for totalfeltet ikke bygges opp av Q_{1000} -flommer for hvert enkelt delfelt, fordi dette vil gi en økende overestimering av Q_{1000} nedover i vassdraget.

Dersom det nederste magasinet har lite lokalfelt og liten kritisk varighet (liten demping) i forhold til ovenforliggende magasin, kan det være dimensjonerende avløpsflom fra magasinet ovenfor pluss et lite bidrag fra lokalfeltet som er dimensjonerende.

En alternativ beregningsmåte vil kunne være å basere analysen på

nedbørdata (P1000) og da benytte samme fremgangsmåte som beskrevet for PMF i avsnitt 7.3. Beregningene bør da kontrolleres med flomfrekvensanalyser i utvalgte felter.

7.3. Påregnelig maksimal flom

Problemene ved PMF-beregninger for sammensatte felt oppstår først og fremst når vi har magasiner med svært forskjellig flomdempende effekt, dvs. forskjellig kritisk varighet T_M . Da vil det i utgangspunktet være forskjellige nedbørvarigheter og forskjellige arealreduksjonsfaktorer som er kritiske for de ulike magasiner. Vi har for eksempel ofte små inntaksmagasiner med betydelige lokalfelt nedenfor store hovedmagasiner. For hovedmagasinet kan det være nedbør over flere døgn, eller vårflommen, som er dimensjonerende, mens det for inntaksmagasinet alene kan være nedbør over noen få timer som er kritisk. Det vil ofte være urimelig å anta at disse situasjonene kan inntreffe samtidig.

I de fleste tilfelle vil vi kunne bestemme en største kritisk varighet for et av magasinene (hovedmagasinet), finne arealreduksjonen for totalfeltet og fordele nedbøren på delfeltene.

Vi kan fordele nedbøren jevnt over hele feltet i følgende situasjoner:

- Når kritisk varighet for nederste magasin er av samme størrelse eller større enn for ovenforliggende magasiner. Nederste magasin betraktes da som hovedmagasin. Vurdering av flomskapende periode og valg av kritisk varighet baseres da på dette magasinet.
- Når kritisk varighet for nederste magasin er mindre enn for ovenforliggende magasiner, men lokalfeltet er lite, ca. 10% av totalfeltet eller mindre. Magasinet med størst kritisk varighet betraktes da som hovedmagasin.
- Når kritisk varighet for nederste magasin er mindre enn for ovenforliggende magasiner, men lokalfeltet er stort, ca. 40 % av totalfeltet eller mer. Nederste magasin betraktes da som hovedmagasin.

I noen situasjoner kan imidlertid flom fra ovenforliggende magasiner bli så sterkt dempet at lokalfeltets flom blir dominerende selv om lokalfeltet utgjør en relativt liten del av totalfeltet. Man vil da redusere nedbøren for mye ved å benytte arealkorreksjon for hele feltet. Tilsvarende situasjoner kan også oppstå når lokalfeltet systematisk har mye høyere nedbør enn resten av feltet.

7.3.1. Nedbør jevnt fordelt over totalfeltet

Utgangspunktet vil være å først bestemme flomskapende periode og

kritisk varighet til hovedmagasinet. Framgangsmåten deretter blir da:

- Nedbørens kritiske varighet (D) settes lik summen av kritisk varighet for hovedmagasinet (T_M) og konsentrasjonstiden for det største delfeltet (T_F).
- PMP-verdien for denne kritiske varigheten korrigeres med arealreduksjonsfaktoren for totalfeltet.
- Nedbørforløpet konstrueres som angitt i avsnitt 5.2.4. og dette antas å være representativt for alle delfeltene.

Ut fra dette nedbørforløpet kan tilløpsflommen for hvert enkelt delfelt beregnes ved hjelp av flommodellen, som skal være individuelt tilpasset hvert delfelt. Disse beregningene skal utføres for en total flomvarighet på minst 1,5 ganger kritisk varighet (D). Flomutviklingen i vassdraget beregnes deretter ved rutning gjennom magasiner og vannveier. Dersom snøsmelting tas i betraktning, må som regel høydefordelingen av hvert delfelt være beskrevet i flommodellen.

Det er viktig å være klar over at en beregning etter denne metoden bare gir påregnelig maksimal avløpsflom for nederste magasin. For magasiner lenger opp i vassdraget vil flommen i dette tilfelle bli mindre enn PMF, fordi arealreduksjonen av nedbøren vil bli for stor og overføringene kan bli behandlet gunstigere når totalfeltet vurderes. For ovenforliggende magasiner må PMF-beregningen derfor foretas separat.

Eksempler på rutning gjennom to magasiner i serie er vist i figur 6.

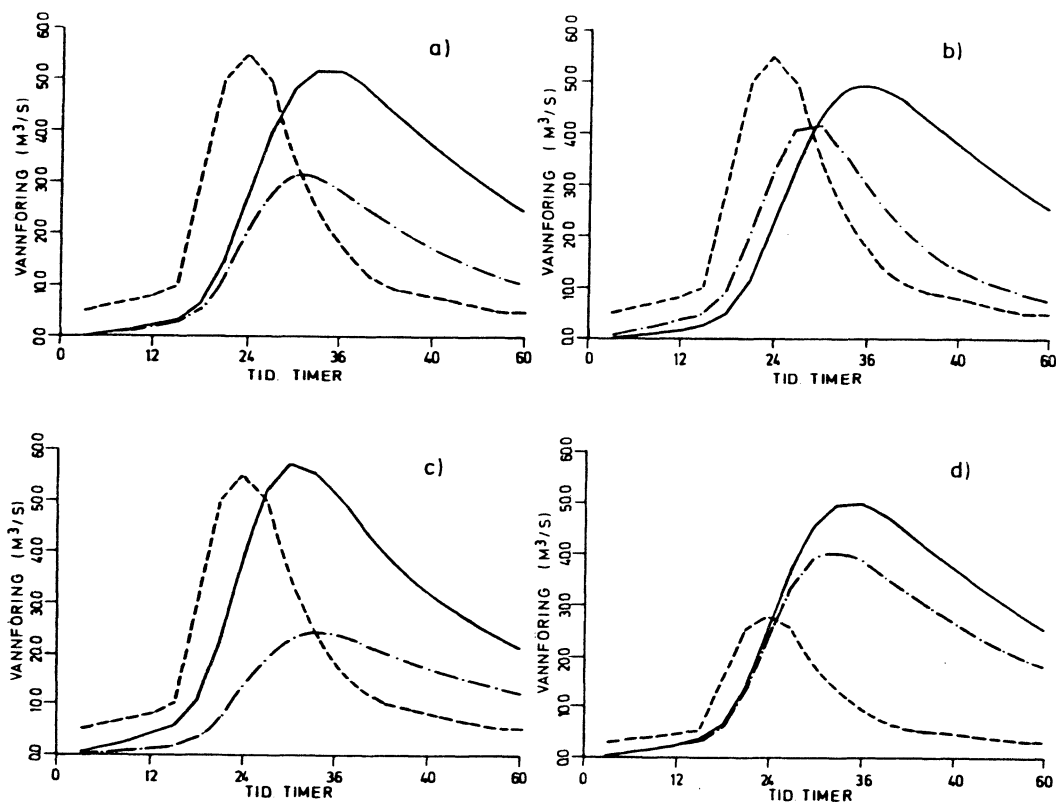
7.3.2. Nedbør sentrert over lokalfeltet

Følgende metode kommer først og fremst til anvendelse ved beregninger for to magasiner i serie, når nederste magasin har liten dempning sammenlignet med ovenforliggende magasin og nedre magasin samtidig har et betydelig lokalfelt som likevel er mindre enn halvparten av totalfeltet. I stedet for å fordele nedbøren jevnt over hele totalfeltet kan det da være riktigere å legge hovedtyngden av nedbøren til lokalfeltet som er mest kritisk for flommen. Kritisk varighet defineres da av dette lokalfeltet.

Framgangsmåten vil være:

Nedbørens kritiske varighet settes lik summen av kritisk varighet for nederste magasin og konsentrasjonstid for lokalfeltet.

PMP for lokalfeltet skales etter arealreduksjonskurven for lokalfeltets areal. Samme nedbørforløp benyttes for resten av totalfeltet, men skaleringsfaktoren justeres til arealreduksjons-



Figur 6. *Eksempler på ruting gjennom to magasiner i serie:*
 a) *med like store delgeler og like store magasiner*
 b) *med like store delgeler og nedre magasin 3 ganger større enn øvre magasin*
 c) *med like store delgeler og øvre magasin 3 ganger større enn nedre magasin*
 d) *med øvre delgelt 3 ganger større enn nedre delgelt og øvre magasin 3 ganger større enn nedre magasin.*

For disse eksemplene gjelder at totalfeltet er det samme ($=100 \text{ km}^2$) og totalt magasinareal er det samme ($=2 \text{ km}^2$). I hvert eksempel er også benyttet samme spesifikke flomforløp for begge delgeler (flomkulminasjon $=1100 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$).

----- lokaltilsig til nedre magasin
 -.-.-.- avløp fra øvre magasin
 ——— avløp fra nedre magasin

faktoren for totalfeltet, på følgende måte:

Når indeks 1 betegner lokalfeltet, indeks 2 resten av totalfeltet og indeks t totalfeltet har vi:

$$P_t A_t = P_1 A_1 + P_2 A_2$$

der P betegner nedbørverdier og A feltarealer.

Dersom nedbørforholdene er noenlunde likartede innen totalfeltet, kan vi sette:

$$P_t = C_t P, P_1 = C_1 P, P_2 = C_2 P$$

der C_t og C_1 er arealreduksjonsfaktorene for totalfeltet og lokalfeltet. Skaleringsfaktoren for resten av totalfeltet blir dermed:

$$C_2 = (C_t A_t - C_1 A_1) / A_2$$

Ved store variasjoner i nedbørforholdene innen totalfeltet, bør man heller basere nedbørfordelingen på grunnlag av kartlegging av store nedbørsituasjoner, eller nedbørfordelingskart, i samråd med DNMI.

Tilløpsflom til begge magasin simuleres ut fra arealreduert nedbørforløp tillagt evt. snøsmelting ved hjelp av flommodellen, og den videre framregning av påregnelig maksimal avløpsflom og maksimal flomvannstand for nederste magasin blir som beskrevet under avsnitt 7.1.

I grensetilfelle må man kontrollregne med ovenforliggende magasin som hovedmagasin (7.3.1).

7.3.3. Store, sammensatte felt

For store felt kan nedbørforholdene være sterkt varierende, og nedbørfordelingen bør baseres på kartlegging av store historiske flomskapende episoder. Det kan også være på sin plass å la PMP-situasjonen bevege seg over feltet med en gitt hastighet. Slike beregninger må utføres i nært samarbeide med DNMI.

8. SUMMARY IN ENGLISH

The intention of the report is to present a guideline to flood estimations in Norway.

According to "The Norwegian Regulations for Planning, Construction and Operation of Dams" [1], hydrological calculations shall be made to determine the design inflow flood, design outflow flood, probable maximum inflow flood and probable maximum outflow flood, with associated water levels in the reservoir.

The design inflow flood is defined as the inflow flood that occurs at a return period of one thousand years. It shall be used as the basis for the design of the spillways and outlet works. The probable maximum inflow flood, which is based on analysis of the most unfavourable combinations of meteorological and hydrological conditions possible, shall form the basis for calculations to check the safety of the dam against failure.

The report is confined to hydrological estimations. It contains the estimation techniques recommended at present, and covers the following main topics:

- Initial conditions: Initial water levels in the reservoirs, control structures in the transfer system, capacity of spillways, etc. The calculations should take into account the possibility that it may not be possible to close off any transfers to the catchment and that transfers from the catchment may be blocked [1].
- Basic data: Meteorological data, hydrological data, data quality control, catchment characteristics.
- Calculation of design inflow flood: General estimation technique (normally the statistical approach, alternatively the application of a hydrological model [5]), flood seasons, flood duration.
- Calculation of probable maximum inflow flood: General estimation technique, precipitation/snowmelt, seasons, duration, area reduction, distribution in time, the application hydrological models.
- Calculation of the design flood water level and the design outflow flood: Routing techniques.
- Flood calculation in a complex catchment (cascade of reservoirs): Considerations on the special problems in such cases concerning both the design inflow flood and the probable maximum inflow flood, including estimation of areal precipitation.

It is recommended that all calculations involving meteorological estimations should be made in consultations with the Norwegian Meteorological Institute.

It is emphasized that the estimation techniques recommended in this report are based on research and experiences up to present

date. Ongoing projects, especially concerning calculations for large and complex catchments, will most likely produce results that will require the report to be revised.

It should also be noted that the Hydrological Department at the Water Resources Directorate is given the authority to sanction all flood estimations made with reference to "The Norwegian Regulations for Planning, Construction and Operation of Dams".

9. REFERANSER

[1] NVE:

Forskrifter for dammer.
Universitetsforlaget, 1981.

[2] DNMI:

Påregnelige ekstreme nedbørverdier.
Fagrapport nr. 3/84 KLIMA.

[3] NVE, Hydrologisk avdeling:

Kontoret for overflatehydrologi.
Data-arkiv pr 18.11.1983 (oppdateres regelmessig).

[4] NVE, Hydrologisk avdeling:

Regional flomfrekvensanalyse for norske vassdrag.
Rapport nr 2-1978.

[5] NVE, Hydrologisk avdeling:

Hydrologisk modell for flomberegninger.
Rapport nr 2-1983.

[6] WMO:

Manual for estimation of probable maximum precipitation.
World Meteorological Organization, Operational Hydrology,
Report No. 1, 1973.

[7] NERC:

Flood studies report.
Natural Environment Research Council, London, 1975.

[8] NERC:

The areal reduction factor in rainfall frequency estimation.
Natural Environmental Research Council, Report No. 35, 1976.

[9] ICE:

Floods and reservoir safety: an engineering guide.
Institute of Civil Engineers, London, 1978.