

# Hydrologisk dimensjonering i små nedbørfelt

Evaluering av metodene

**Mathilde Hanssen**

**Søndena**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Knut Alfredsen, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk



NTNU

NORGES TEKNISK NATURVITENSKAPLIGE UNIVERSITIET

Institutt for Bygg- og miljøteknikk

## Masteroppgåve i VA-teknikk

*Kandidat: Mathilde Hanssen Søndena*

**Tema: Hydrologisk dimensjonering i små nedbørfelt**

### **1 BAKGRUNN**

Hydrologisk dimensjonering av infrastruktur er ei utfordring i små felt då vi svært ofte ikkje har grunnleggande data for feltet, og metodane for umålte felt og overføring av data medfører stor uvisse. Uansett er dette eit viktig område på grunn av skadepotensiale ved feil og sidan dei scenario vi har for utvikling av ekstremnedbør i framtida vil kunne ha stor påverknad i slike felt. I samband med KLIMA2050 er det starta eit prosjekt som skal sjå på moglege metoder for å forbetre handtering av beregning av ekstremverdiar umålte småfelt, og det er nyleg avslutta arbeid i NIFS prosjektet som har gått igjennom metoder for slik dimensjonering. Tidlegare arbeid peiker på ein del uvisse faktorar ved bruk av dei ulike metodane, og målet med denne oppgåva er både å prøve å sjå på dette i detalj samt å vurdere andre faktorar som kan føre til svikt i kapasiteten til t.d. kulvertar. Prosjektet bygger på den metodeoversikta som er laga i prosjektoppgåva på same tema.

### **2 ARBEIDSOPPGÅVER**

Oppgåva vil ha følgjande hovuddelar:

1. Metodene som er mest aktuelle for dimensjonering i Norge (som omtalt i prosjektoppgåva) skal vurderast i detalj for nedbørfelt der ein har data. Problemstillingar å analysere kan vere:
  - a. Kva betyr starttilstanden for resultata frå dei ulike metodene.
  - b. Korleis stemmer lokalt kalibrerte data med generelle data frå formelverk
  - c. Vurdering av uvisse i nedbørddata
  - d. Effekt av arealbruk på dimensjonerande flom
  - e. Samanheng mellom ekstrem nedbør og ekstrem flom

2. Det kan vere ulike grunnar til at t.d. ein kulvert feilar. Kva effekt har t.d. tilstopping for kapasiteten, og kva andre faktorar må vere med?
3. Gjere ei vurdering av metodane som er brukt i umålte felt med bakgrunn i resultat frå 1 og 2 og frå tidlegare arbeid med dimensjonering i jernbaneverket. Er der metoder eller analyser som kan gjerast for å redusere uvissa i slike beregningar?

### **3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON**

Faglærer vert professor Knut Alfredsen ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. Prosjektet vert gjennomført som eit samarbeid med jernbaneverket i Trondheim, der Geir Vatne og Maria Hetland Olsen er kontaktpersonar. Kandidaten er elles ansvarleg for innsamling, kontroll og bruk av data. Hjelp frå ovannemnde eller andre må refererast i rapporten.

### **4 RAPPORT**

Struktur og oppsett av rapporten er viktig. Gå utifrå at målgruppa er teknisk personell på seniornivå. Rapporten skal innehalde eit samandrag som gir lesaren informasjon om bakgrunn, framgangsmåte og hovudresultata. Rapporten skal ha innhaldsliste og referanseliste. Referanselista skal vere formatert etter ein eksisterande standard.

Formatet på rapporten skal følgje standarden ved NTNU. Alle figurar, kart og bilete som er inkludert i rapporten skal vere av god kvalitet med tydeleg tekst på akse og teiknforklaring.

Kandidaten skal inkludere ei signert fråsegn som seier at arbeidet som er presentert er eins eige, og at alle bidrag frå andre kjelder er identifiserte gjennom referanser eller på andre måtar.

Frist for innlevering er 11. juni 2017.

Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU

Knut Alfredsen,

Professor

## SAMMENDRAG

Formålet med masteroppgaven er å gi en vurdering av metoder for flomberegning brukt ved små, uregulerte nedbørfelt i Norge. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) omtaler spesifikt fire metoder for flomberegning i sine veiledere, hvorav alle er evaluert i denne oppgaven. Aktuelle beregningsmetoder er presentert nedenfor.

- Flomfrekvensanalyse
- Formelverk for små nedbørfelt
- Den rasjonale metode
- PQRUT

Metodene er benyttet til å estimere vannføring med utgangspunkt i feltparametere fra valgt observasjonsområde. Resultatene er sammenlignet med observert flomdata fra observasjonsområdet. Vurderinger er gjort med utgangspunkt i resultater fra flomfrekvensanalyse for bestemmelse av gjentaksintervall. Resultatene ved formelverket er funnet å samsvare best med observert flomdata. Estimert vannføring ved den rasjonale metode er gjennomgående høyere enn observert flomverdi, mens PQRUT er funnet å underestimere vannføring. Dette kan skyldes nedbørfeltets størrelse, som er større enn anbefalt ved bruk av den rasjonale metode og antakelig for lite til at modellen ved PQRUT responderer tilstrekkelig.

Nedbørdata som IVF-kurver og design hyetogram legges til grunn for enkelte hydrologiske dimensjoneringsmetoder. På bakgrunn av dette er usikkerhet i nedbørdata også vurdert. Det er funnet store lokale nedbørvariasjoner, hvorav prosentvis avvik mellom Svarttjønnbekken og Voll er rundt 40 %. Design hyetogram er konstruert med utgangspunkt i data fra IVF-kurve eller ekstremnedbørverdier, med varighet lik henholdsvis konsentrasjonstid eller 24 timer. Hyetogram med utgangspunkt i ekstremnedbør er funnet å samsvare beste med observert nedbør. Dette kan skyldes varigheten på nedbør da de fleste flomhendelser er funnet å genereres av mer langvarig nedbør.

Den rasjonale metode og PQRUT tar utgangspunkt i at nedbør med gitt gjentaksintervall genererer flom med tilsvarende gjentaksintervall. Samsvarende gjentaksintervall for nedbør og

vannføring er identifisert for kun 2 av totalt 13 observerte flomhendelser. Det er også funnet at flertallet av ekstremnedbørhendelser ikke genererer store flomhendelser, en trend som også dokumenteres ved tidligere studier. Dette utgjør en stor feilkilde ved metodene. Simulerte nedbørserier kan benyttes framfor design hyetogram for å minimere usikkerhet. Et eksempel er SCHADEX metode som resulterer i en sannsynlighetsfordeling for avrenning basert på en lang serie med mulige regnintensiteter og faktorer for nedbørfelt.

Hydrologisk dimensjonering omfatter videre kapasitetsberegning av stikkrenner, som ofte baseres på vannføring bestemt ved flomberegningsmetode. Det er vurdert hvordan vannstand ved innløp, redusert tverrsnittareal og helning påvirker kapasiteten. Stikkrenne er videre dimensjonert ved gitt observasjonsområde for å vurdere hvordan redusert tverrsnittareal vil påvirke dimensjonerende gjentaksintervall. Resultater viser stor reduksjon av kapasitet ved prosentvis reduksjon av tverrsnitt. For sirkulær stikkrenne er 20 % redusert tverrsnittareal funnet å tilsvare en kapasitetsreduksjon på  $0,81 \text{ m}^3/\text{s}$  og dimensjonerende gjentaksintervall er redusert fra 200 til 14 år. Dette påpeker viktigheten av rensk og vedlikehold av stikkrenner.

## ABSTRACT

The purpose of this master thesis is to evaluate methods for estimating flood used in small, ungauged catchments in Norway. Four methods are described in guidelines given by the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), all of which are evaluated in this thesis. The methods are presented below.

- Flood frequency analysis
- Formulas given by NIFS-project
- The rational method
- PQRUT

Runoff are estimated based on field parameters from a selected observation area, which enables comparison between results and observed runoff. Frequency analysis are used to determine return period. Results when using the formulas given by NIFS is found to correspond best with observed runoff. The rational method is found to consistently estimate runoff higher than observed, while PQRUT is found to underestimate runoff. This can be due to the size of the observed catchment, which is larger than recommended for the rational method and possibly too small for the PQRUT model to respond.

For some methods, flood is estimated based on precipitation data, which is typically given as IDF (Intensity, Duration, Frequency)-curve or design hyetograph. Therefore, uncertainty in precipitation data is also considered. The local variation between Svarttjønnbekken and Voll is found to be significant, of which percentage deviation are approximately 40 %. Design hyetograph are constructed both based on IDF-curve with a duration equal to the concentration time of the catchment and based on extreme precipitation values with a duration of one day. The hyetograph based on extreme precipitation are found to correspond best with observed precipitation. This can be due to the duration of the precipitation as most flood events are found to be generated by precipitation with a longer duration.

When estimating runoff based on the rational method and PQRUT, it is assumed that precipitation with a given return period will generate runoff with corresponding return period. Based on observed flood events, this is found to be applicable for only 2 out of 13 events. Also,

extreme precipitation is found not to generate big floods for most of extreme precipitation events. To reduce uncertainty, simulated precipitation models can be used. An example is SCHADEX method which results in a probability distribution of runoff based on a series of possible precipitation intensities and catchment factors.

Hydrological dimensioning also includes calculations of culvert capacity, which are typically based on flood calculations using the given methods. Varying water level at the inlet and reduced cross-sectional area are found to affect the culvert capacity. Further, a culvert is dimensioned for the selected observation area. The culvert capacity is found to be reduced by 0,81 m<sup>3</sup>/s when the cross-sectional area is reduced by 20 %, and the dimensional return period is reduced from 200 to 14 years. The result point out the importance of culvert maintenance.



## FORORD

Masteroppgaven ”Hydrologisk dimensjonering i små uregulerte nedbørfelt” er skrevet av Mathilde Hanssen Søndena våren 2017, og tilsvarer 30 studiepoeng. Arbeidet er en videreføring av prosjektoppgaven ”Hydrologiske dimensjoneringsmetoder i små uregulerte nedbørfelt”, med større fokus på evaluering av metodene. Oppgaven markerer slutten på tiden som student, og er avsluttende arbeid på Bygg- og miljøteknikkstudiet ved NTNU i Trondheim.

Oppgaven har i stor grad bestått av datainnhenting og databehandling. Data for ulike målinger er satt i sammenheng for å gi bedre muligheter for vurdering og sammenligning av metoder. Arbeidet har gitt mulighet til å anvende kunnskap fra tidligere fag i studiet, som hydrologi og hydrologisk modellering. Det har vært spennende og lærerikt å sette seg inn i de ulike metodene. Metodene med mye statistikk til grunn har vært spesielt krevende.

Jeg vil rette en stor takk til veileder Knut Alfredsen for god støtte og veiledning. Videre vil jeg takke Geir Vatne og Maria Hetland Olsen i Bane Nor for gode innspill. Takk til far for hjelp til gjennomlesing. Til slutt vil jeg rette en stor takk til medstudenter på kontoret for god faglig diskusjon og hjelp under arbeidet, i tillegg til et godt arbeidsmiljø.

*Mathilde H. Søndena*

Mathilde H. Søndena

Trondheim, juni 2017



# INNHOOLD

<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>FORORD</b> .....	<b>V</b>
<b>INNHOOLD</b> .....	<b>VII</b>
<b>FIGURLISTE</b> .....	<b>IX</b>
<b>TABELLISTE</b> .....	<b>X</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn.....	2
1.2 Formål og omfang.....	2
1.3 Begrep.....	3
<b>2 LITTERATUR</b> .....	<b>5</b>
<b>3 OBSERVASJONSOMRÅDE</b> .....	<b>7</b>
<b>4 HYDROLOGISKE DIMENSJONERINGSMETODER</b> .....	<b>9</b>
4.1 Flomfrekvensanalyse.....	9
4.2 Formelverk for små nedbørfelt.....	11
4.3 Den rasjonale metode.....	12
4.4 PQRUT.....	13
4.5 Design hyetogram.....	15
<b>5 VURDERING AV HYDROLOGISKE DIMENSJONERINGSMETODER</b> .....	<b>19</b>
5.1 Flomfrekvensanalyse.....	23
5.2 Formelverk for små nedbørfelt.....	26
5.3 Sammenligning av nedbør ved ulike nedbørstasjoner.....	28
5.4 Den rasjonale metode.....	31
5.5 Design hyetogram.....	33
5.6 PQRUT.....	38
5.7 Oppsummering og diskusjon.....	41
5.8 Konklusjon.....	46
<b>6 STIKKRENNEKAPASITET</b> .....	<b>49</b>

6.1	Teori.....	50
6.2	Kapasitetsberegninger.....	53
6.3	Oppsummering og diskusjon .....	57
6.4	Konklusjon.....	58
<b>7</b>	<b>STIKKRENNEKAPASITET VED SVARTTJØNNBEKKEN .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>OPPSUMMERING OG KONKLUSJON .....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>VIDERE ARBEID .....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERANSER .....</b>	<b>65</b>
	<b>INNHOLDSLISTE VEDLEGG .....</b>	<b>i</b>

## FIGURLISTE

Figur 1: Beliggenhet og nedbørfelt for Svarttjønnbekken. ....	7
Figur 2: Sannsynlighetsfordelinger med ulike former for skjevhet. ....	10
Figur 3: Illustrasjon av flommodul i PQRUT (Andersen et al., 1983). ....	14
Figur 4: Nedbør ved ulik varighet i prosent av nedbør ved et døgn (Stenius et al., 2015b). ....	17
Figur 5: Uavhengige flomtopper ved Svarttjønnbekken. ....	19
Figur 6: Grafisk framstilling av flomhendelse fra oktober 1983, 3-timers data. ....	20
Figur 7: Grafisk framstilling av flomhendelse fra september 1997, 30-minutters data. ....	21
Figur 8: Lufttemperatur for flomhendelser med 3-timersintervall. ....	22
Figur 9: Lufttemperatur for flomhendelser med 30-minutterstintervall. ....	22
Figur 10: Flomfrekvensanalyse ved seks ulike fordelingsfunksjoner for 3-timers data. ....	24
Figur 11: Årsmiddelnedbør for Norge i perioden 1961-2000 (Norsk klimaservicesenter). ....	30
Figur 12: Akkumulert nedbør tilbake fra flomtopp for 3-timersdata. ....	37
Figur 13: Akkumulert nedbør tilbake fra flomtopp for 30-minuttersdata. ....	37
Figur 14: Definisjoner for beskrivelse av strømningsforhold i en kulvert (NVE, 2010). ....	49
Figur 15: Minimumsfall for innløpskontroll, plastrør t.v. og betongrør t.h. (NVE, 2010). ....	50
Figur 16: Kapasitet for stikkrenne med størrelse 600x600 mm. ....	54
Figur 17: Kapasitet for stikkrenne med størrelse 1000x1000 mm. ....	54
Figur 18: Kapasitet ved frispeilstrømning og varierende tverrsnittareal. ....	55
Figur 19: Kapasitet ved dykket innløp og varierende tverrsnittareal. ....	56
Figur 20: Kapasitet for stikkrenne med tverrsnitt 600x600 mm ved varierende helning. ....	57
Figur 21: Kapasitet for stikkrenne ved Svarttjønnbekken med redusert tverrsnitt. ....	59
Figur 22: Dimensjonerende gjentaksintervall for stikkrenne ved Svarttjønnbekken med redusert tverrsnitt. ....	60

## TABELLISTE

Tabell 1: Veiledende verdier for avrenningskoeffisient C med ulikt dekke. ....	13
Tabell 2: Gjentakintervall for flomhendelser ved Svarttjønnbekken. ....	25
Tabell 3: Gjentakintervall for nedbør for flomhendelser med 3-timers data. ....	26
Tabell 4: Vurdering av formelverk for små nedbørfelt ved utvalgte flomhendelser. ....	27
Tabell 5: Sammenligning av totalt nedbørvolum for stasjoner, basert på 3-timers data. ....	29
Tabell 6: Sammenligning av totalt nedbørvolum for stasjoner, basert på 30-minutters data. .	29
Tabell 7: Resultat ved den rasjonale metode for Svarttjønnbekken. ....	31
Tabell 8: Nødvendig avrenningskoeffisient for observerte flomhendelser.....	32
Tabell 9: Nedbørvolum for flomhendelser med tidssteg 30 minutter og gjentakintervall 2 år. .....	34
Tabell 10: Nedbørvolum for flomhendelser med tidssteg 3 timer og gjentakintervall 5 år. ..	34
Tabell 11: Nedbørvolum for flomhendelser med tilnærmet 2-års gjentakintervall.....	35
Tabell 12: Nedbørvolum for flomhendelser med tilnærmet 5-års gjentakintervall.....	35
Tabell 13: Parameter-verdier ved PQRUT. ....	39
Tabell 14: Vannføring for Svarttjønnbekken basert på PQRUT. ....	40
Tabell 15: Gjentakintervall for vannføring og nedbør ved flomfrekvensanalyse. ....	42
Tabell 16: Nedbørvolum for hyetogram basert på IVF-kurve og ekstremnedbør. ....	45

# 1 INNLEDNING

Et samarbeid mellom Meteorologisk institutt, Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE) og Uni Research har resultert i en rapport for klima i Norge 2100. I rapporten kommer det blant annet fram at regnflommene i Norge vil bli større, og komme oftere. Rapporten bekrefter at tendensen til økt hyppighet av regnflommer de siste tiårene er konsistent med økningen i ekstremnedbør (Hanssen-Bauer et al., 2015). Hydrologisk dimensjonering av infrastruktur er stadig viktigere som følge av økende mengde og omfang av flommer. Fagkunnskap innen feltet er også svært viktig med tanke på å begrense det eventuelle skadepotensialet.

Hydrologisk dimensjonering av infrastruktur er en utfordring da grunnleggende data ofte er manglende og det er store usikkerheter i metoder og dataoverføring. Valg av metode for flomberegning avhenger av faktorer som størrelse på nedbørfelt, arealbruk og datatilgjengelighet for feltet. Bestemmelser rundt gjentaksintervall og eventuelt klimafaktor må også tas. Klimafaktoren legges til for å ta høyde for en økning i avrenning som følge av økt nedbør med klimaforandringene.

I samarbeid med Bane NOR er det satt i gang et arbeid for å vurdere metoder for flomberegning i små uregulerte nedbørfelt, samt vurdere hvordan ulike parameterendringer vil påvirke kapasiteten for stikkrenner. Bane NOR er en av aktørene som vil bli sterkt rammet ved økning i regnflommer. Dette har vist seg ved flere tilfeller de siste årene, hvor utrasing av jernbanefylling har skjedd som følge av at stikkrenner ikke fungerer optimalt eller har for liten kapasitet. Myrabø (2014) viser til mange vannrelaterte skadehendelser på jernbanen de senere årene, hvorav det er gitt at flomhendelser med store ødeleggelser for veg og jernbane skjedde omtrent hver annen måned gjennom 2014. På bakgrunn av dette vil metoder for flomberegning være viktig ved dimensjonering av nye stikkrenner, i tillegg til muligheter for å simulere framtidige flomsituasjoner.

Ved dimensjonering av kulverter og stikkrenner bruker Bane NOR i dag den rasjonale metode for nedbørfelt mindre enn 1 km<sup>2</sup>. For større felt benyttes en kombinasjon av flere metoder. Det stilles krav om å bruke 200 års gjentaksintervall og en klimafaktor på 1,2 (20 %) ved dimensjoneringsberegninger av stikkrenner og øvrig dreneringsanlegg (Bane NOR, 2015).

## **1.1 Bakgrunn**

Det har lenge vært pågående arbeid for vurdering av hydrologiske dimensjoneringsmetoder. Deriblant det nylig avsluttede arbeidet i NIFS (Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred) – prosjektet, en felles satsing mellom Bane NOR, Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE) og Statens vegvesen. Prosjektet er gjennomført i perioden 2012-2015 med mål om å gi økt sikkerhet, større robusthet og bedre regularitet for den landbaserte transporten gjennom en felles strategi (Myrabø et al., 2016). NIFS har resultert i flere rapporter som sammenligninger og gir anbefalinger for hydrologiske dimensjoneringsmetoder.

Det er også pågående arbeid innen fagfeltet gjennom KLIMA2050 og FlomQ. KLIMA2050 er et forskningssenter med mål om å redusere samfunnsrisiko som følge av klimaforandringer, økt nedbør og flom i bebygde områder. Forskningssenteret er et samarbeid mellom ulike norske universitet, aktører innen offentlig sektor som kommuner, Statens Vegvesen og Bane NOR og privat sektor. Målet er å redusere samfunnsmessige risiko forbundet med klimaendringer, økt nedbør og eksponering av flomvann i bebygde områder (KLIMA2050, 2017). Forskningsprosjektet FlomQ er startet av Energi Norge med mål om å forbedre dagens retningslinjer for flomestimering i Norge.

Flere av prosjektene har resultert i veiledere og anbefalinger som er lagt til grunn for videre vurderinger i denne oppgaven.

## **1.2 Formål og omfang**

Formålet med denne oppgaven er å gi en detaljert vurdering av metoder for hydrologisk dimensjonering som er brukt i Norge i dag. Vurderinger baseres på sammenligning mellom observasjonsdata og beregningsresultater med utgangspunkt i felles observasjonsområde, og omfatter:

- Betydning av starttilstand for resultatene av de ulike metodene
- Samsvar mellom lokalt kalibrerte data og generelle data fra formelverk
- Usikkerhet i nedbørdata
- Sammenheng mellom ekstrem nedbør og ekstrem flom



Metodene benyttes typisk som utgangspunkt ved dimensjonering av kulverter/stikkrenner. På bakgrunn av dette skal oppgaven også gi en vurdering av stikkrennekapasitet ved varierende

- Vannstand ved innløp
- Helning
- Tverrsnittareal

Stikkrenne/kulvert skal dimensjoneres med utgangspunkt i data fra observasjonsområde. Dette skal videre benyttes til å evaluere hvordan redusert tverrsnittareal påvirker dimensjonerende gjentaksintervall.

Oppgaven er inndelt i tre deler. Første del tar for seg hydrologiske dimensjoneringsmetoder, og omfatter kapittel 4 og kapittel 5. Kapittel 4 presenterer hydrologiske dimensjoneringsmetoder, mens metodene evalueres i kapittel 5. En kort innføring i stikkrennekapasitetsberegning er gitt i kapittel 6. Til slutt kombineres dette i kapittel 7, hvor hydrologisk dimensjonering utføres i praksis ved bestemt observasjonsområde. De to første delene er gitt med en kort innledning, teori, metode og resultater i ett, diskusjon og konklusjon. Resultatene diskuteres i hovedsak i diskusjonsdelen. Siste del kombinerer teori fra foregående kapitler, hvorav metode, resultat og diskusjon er gitt i ett. Helt til slutt er det gitt en kort oppsummering og konklusjon for den totale oppgaven i kapittel 8 og forslag til videre arbeid i kapittel 9.

### 1.3 Begrep

**Empirisk modell** er basert på observasjoner og/eller erfaringer. Flomberegning ved empiriske modeller er som regel basert på observerte nedbørshendelser. Eksempel er den rasjonale metode.

**Gjentaksintervall/returperiode, T**, er et tall for hvor mange år det i gjennomsnitt går mellom hver gang en bestemt vannføring oppstår (Stenius et al., 2015b).

**Hyetogram** er basert på IVF-kurve eller observert ekstremnedbør, hvor konstruksjonsprinsippet er at volumet av nedbør innen de X mest intensive minuttene i hyetogrammet skal tilsvare regnvolumet ved en nedbørhendelse med konstant nedbørintensitet

som varer  $X$  minutter. Hyetogrammet antas å være symmetrisk om sin midtakse (Lindholm et al., 2003).

**IVF-kurve** (Intensitet-varighet-frekvens) er en kurve som angir hvilken nedbørintensitet som kan forventes ved ulike varigheter og gjentakintervall (Stenius et al., 2015b). Kurven brukes ofte ved planlegging og utforming av infrastruktur.

**Konsentrasjonstid,  $t_c$** , til et nedbørfelt er tiden det tar for vannet å renne fra de fjerneste delene av feltet til utløpet (Stenius et al., 2015b).

**Kulminasjonsverdi** er den høyeste faktiske verdien av en flomhendelse (Stenius et al., 2015b).

**Middelflom,  $Q_M$** , er gjennomsnittet av maksimal vannføring per år/sesong, avhengig av hva som ønskes vurdert (Stenius et al., 2015b).

**Nedbørfelt** er en hydrografisk inndeling av vassdrag hvor utløpet er i ett punkt, eller eventuelt i havet ved kystfelt. Alt nedbør som faller innenfor feltet vil renne ut i et felles utløp, med unntak av vannet som infiltreres til grunnen eller som fordamper. Ved små nedbørfelt vil infiltrasjon og fordamping ha mindre betydning enn for større felt. Nedbørfelt deles typisk inn i svært små felt ( $< 1 \text{ km}^2$ ), små felt ( $< 50 \text{ km}^2$ ) og store felt som kan bli flere tusen kvadratkilometer (Stenius og Glad, 2015).

**Nedbør-avløpsmodeller** benytter et bestemt nedbørforløp, eventuelt sammen med snøsmelteforløp, som omregnes til vannføring i et bestemt nedbørfelt (Stenius et al., 2015b). Eksempel er PQRUT.

**Normalperiode** er perioder på 30 år, definert av verdens meteorologiorganisasjon (WMO). Periodene brukes for å beregne normalverdier for ulike værelementer. Dagens normalperiode er 1961-1990, og neste vil være 1991-2020.

**$Q_T$**  er en flom med gjentakintervall  $T$  år (NVE, 2010).

## 2 LITTERATUR

Flere samarbeidsprosjekt er satt i gang for vurdering av hydrologiske dimensjoneringsmetoder og usikkerheter rundt metodene, som blant annet NIFS og KLIMA2050. Fagfeltet er også arbeidet mye med gjennom forskning og doktorgradstudier. Videre har studenter ved flere høyskoler og universitet arbeidet med temaet gjennom prosjekt- og masteroppgaver. Litteratur fra studier innen fagfeltet er sammenlignet med resultater i denne oppgaven for å underbygge konklusjoner.

Energi Norges forskningsprosjekt, FlomQ, hadde oppstart i 2014 med hovedmål om å komme fram til et vitenskapelig grunnlag for å revidere dagens retningslinjer for flomestimering i Norge. Kunnskapsgrunnlaget vil være av nytte for dimensjonering av framtidig kraftverk samt flomavledning i forbindelse med infrastruktur som veg, jernbane og avløp. Prosjektet har funnet fire måter å forbedre dagens praksis på (Basberg, 2016):

- Simulering av ekstrem nedbør kan gi representativ og lang historikk som kan brukes i nedbør-avløpsmodeller.
- 3D-modellering av vannstand-vannføringskurver for ekstremflom kan redusere usikkerhet i ekstremflomestimer.
- Bayesiansk tilnærming til flomfrekvensanalyse for gjentaksintervall over 200 år kan gi mer pålitelige estimater for flomstørrelse med tilhørende realistiske usikkerhetsanslag.
- Stokastisk simulering av nedbør til bruk i statistisk-fysisk modellering av ekstremflom kan gi forbedret nedbør-avløpsmodell med konsistente estimater, bedre samsvar med flomfrekvensanalyse og færre subjektive vurderinger.

Forskningsarbeid innen fagfeltet har resultert i flere vitenskapelige artikler som tar for seg temaet. Usikkerhet rundt IVF-kurver er vurdert av Hailegeorgis og Alfredsen (2016), med Risvollan som observasjonsområde. Ved studien konstrueres flere IVF-kurver basert på nedbørserier på 30 år med ulikt start- og sluttidspunkt. Dette resulterer i IVF-kurver med store variasjoner, som kan skyldes klimatiske variasjonsmønstre. Hailegeorgis og Alfredsen har funnet at usikkerheten i IVF-kurvene ofte utligner klimafaktoren da konfidensintervallet til kurvene er stort. Det er videre funnet at under halvparten av verdiene for maksimal årsnedbør genererer store flomhendelser og at nedbør med en bestemt returperiode ikke nødvendigvis

genererer flom med tilsvarende returperiode. Effekter av snøsmelting/snøakkumulering og tilstand i nedbørfelt (tørt,vått) er funnet å ha stor betydning. Resultatene underbygger behovet for bedre forståelse av sammenheng mellom nedbør og generert flom, samt usikkerhetsvurdering og utvikling av pålitelige metoder for utforming av infrastruktur.

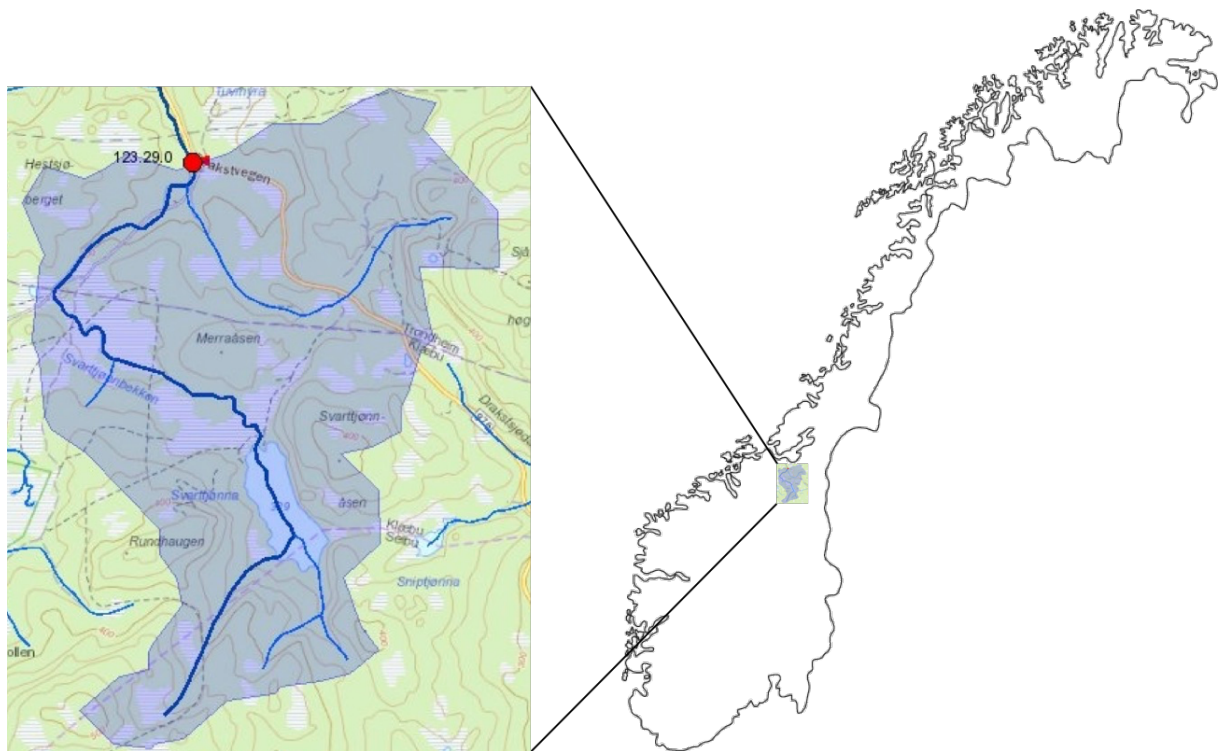
I en studie utført av Lawrence et al. (2014) er stokastiske, semi-kontinuerlige simuleringer av nedbør benyttet til estimering av flom ved tre ulike observasjonsområder i Norge. For alle observasjonsområder spiller snøsmelting en viktig rolle. Simuleringen er basert på SCHADDEX metode, som genererer en lang serie med mulige regnintensiteter og faktorer for nedbørfelt og produserer avrenning for XX-returperiode. Resultatene er sammenlignet med ulike hydrologiske dimensjoneringsmetoder, hvorav de er funnet å gi estimater for returperioder som samsvarer best med resultater fra flomfrekvensanalyse. Metoden framhever viktigheten av å ta hensyn til sprikende sannsynlighet for ekstremnedbør, snøsmelting og fuktinnhold i grunnen.

Leuch (2016) har skrevet en bacheloroppgave som omhandler modellering av vannføring i små nedbørfelt. Oppgaven evaluerer modellen SHyFT, en hydrologisk modell etablert av Statkraft. Det konkluderes med at modellen gir vannføring som samsvarer godt med observert flom. Til gjengjeld simulerer ikke modellen tilstrekkelig store flomtopper sammenlignet med observerte flomtopper. Sammenhengen mellom stikkrennekapasitet og observert nedbør ved to rashendelser på jernbanen er også vurdert i studien. Estimert vannføring med utgangspunkt i nedbør ved rashendelsene er funnet å være betydelig lavere enn stikkrennas teoretiske kapasitet ved begge hendelser. På bakgrunn av dette kan det konkluderes med at rashendelsene ikke skyldes underdimensjonering av stikkrenner. I praksis kan kapasitetsproblemer likevel være aktuelt som følge av delvis blokkerte stikkrenner.

Detaljkartlegging av stikkrenner på jernbanestrekningen mellom Stjørdal og Steinkjer, utført av Norges Geotekniske Institutt (NGI) for Bane NOR, bekrefter at vedlikehold av stikkrenner er mangelfullt. Fåtalet av observerte stikkrenner er funnet å være 100 % åpne og fungerende. Mange stikkrenner har redusert kapasitet som følge av lite fall, sedimentasjon i inn-/utløp, blokkering av drivgods, sammenrast eller deformert steinkiste og delvis dykket inn-/utløp (Hefre og Høydal, 2015).

### 3 OBSERVASJONSOMRÅDE

Valgt observasjonsområde for studien er NVEs vannføringsindeksstasjon ved Svarttjønnbekken, som ligger omtrent 18 km sør-øst for Trondheim. NEVINA-rapport for stasjonen er gitt i vedlegg 1, hvor nedbørfelt og feltparametere er presentert. Beliggenhet og nedbørfelt for stasjonen er presentert i figur 1. Nedbørfeltet er kategorisert som et uregulert småfelt, feltet er altså påvirket av menneskelige inngrep i liten grad og har totalt areal mindre enn 50 km<sup>2</sup>. Fra NEVINA-rapport er det gitt at feltet har et areal på 3,5 km<sup>2</sup>, og god dempingeffekt som følge av store skog- og myrarealer.



Figur 1: Beliggenhet og nedbørfelt for Svarttjønnbekken.

Data for vannføring og nedbør er hentet fra stasjonen ved Svarttjønnbeken. Det er tatt utgangspunkt i data med tidssteg 30 minutter og 3 timer. Vannføringsdata er tilgjengelig for periodene 1973-d.d og 1995-d.d., mens nedbørd data er tilgjengelig for periodene 1969-1994 og 1990-2005 for henholdsvis 3-timersdata og 30-minuttersdata.



## 4 HYDROLOGISKE DIMENSJONERINGSMETODER

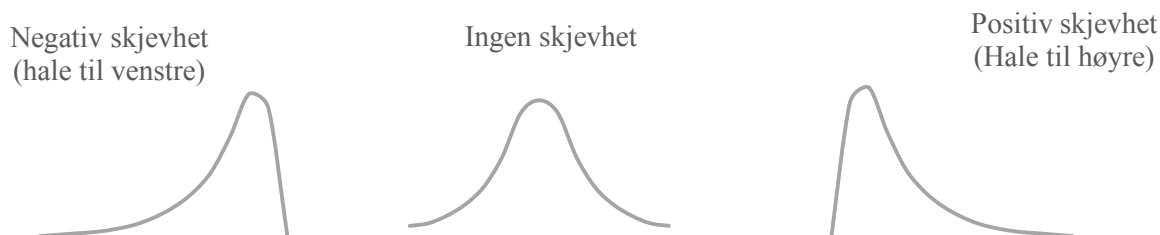
I Norge benyttes i hovedsak fire metoder for hydrologisk dimensjonering; flomfrekvensanalyse, formelverk for små nedbørfelt, PQRUT og den rasjonale metode (Stenius et al., 2015b). Valg av metode avhenger blant annet av feltstørrelse og tilgjengelig datagrunnlag. I noen tilfeller vil en kombinasjon av flere dimensjoneringsmetoder være å foretrekke. Stenius og Glad (2015) anbefaler å utføre beregninger med utgangspunkt i formelverk for små nedbørfelt, og videre utføre flomfrekvensanalyse for å beregne tilløpsflommer med gitte gjentakintervall. For områder med dårlig datagrunnlag kan den rasjonale metode benyttes ved felt mindre enn  $1 \text{ km}^2$ , og PQRUT ved større felt.

En kort beskrivelse av metodene er gitt nedenfor. Søndena (2016) gir en mer omfattende beskrivelse av metodene i prosjektoppgaven ”Hydrologiske dimensjoneringsmetoder i små uregulerte nedbørfelt”. For nedbør-avløpsmodeller legges design hyetogram til grunn for estimering av avrenning. På bakgrunn av dette beskrives også framgangsmåte for å konstruere design hyetogram.

### 4.1 Flomfrekvensanalyse

Flomfrekvensanalyse er basert på analyse av målte avrenningsserier, hvorav frekvensfordelingen bestemmes. Avrenningsserien kan enten være maksimale årsverdier eller et utvalg uavhengige verdier over en gitt grenseverdi. Sammen gir ekstremverdiene et utvalg av tilfeldige variabler som fordeles etter en ekstremverdifordeling og tildeles en overskridelsessannsynlighet (Winter et al., 2011).

Statistiske fordelingsfunksjoner er definert ved  $F_x(x) = P[X \leq x]$ , hvor  $X$  er en stokastisk variabel,  $x$  er et vilkårlig reelt tall og  $P$  er sannsynlighet. For hver mulige verdi,  $x$ , angir fordelingsfunksjonen sannsynligheten for at målingenes sanne verdi er mindre eller lik den aktuelle verdien (Pedersen og Skarpaas, 2012). Fordelingsfunksjoner deles inn i toparameter- og treparameterfordelinger, hvor toparameterfordelinger tilpasses med utgangspunkt i middelverdi og standardavvik, mens treparameterfordelingene tar hensyn til skjevhet i tillegg. Negativ skjevhet indikerer at fordelings venstre hale er lengre enn dens høyre, mens positiv skjevhet indikerer at høyre hale er lengre, illustrert ved figur 2 (Pedersen og Skarpaas, 2012).



Figur 2: Sannsynlighetsfordelinger med ulike former for skjevhet.

For vannføringsdata er det en generell trend at dataen er asymmetrisk, med en viss skjevhet mot høyre (Midttømme et al., 2011). På bakgrunn av dette er treparameterfordelinger et godt utgangspunkt ved tilpasning av vannføringsdata, gitt at datatilgjengelighet er tilstrekkelig. I Norge er generalisert ekstremverdifordeling (GEV) funnet å være et godt alternativ (Hisdal et al., 2013). Ved mindre enn 40-50 år med vannføringsdata er gumbelfordelingen (GUM) et godt alternativ til en toparameter statistisk fordelingsfunksjon da den er asymmetrisk med en viss skjevhet mot høyre (Frontéri, 2015).

Ved høyere antall parametere oppnås ofte svært god tilpasning til utvalget man har da fordelingene tar hensyn til utliggere (outliers) i større grad. Imidlertid kan et høyt antall parametere gi ekstreme verdier ved bruk av korte dataserier, da en enkelt ekstremflom kan påvirke resultatet betraktelig (Stenius og Glad, 2015). Det er derfor anbefalt å benytte GUM ved dataserier kortere enn 40-50 år, og GEV ved lengre dataserier. Ved dataserier kortere enn 30 år anbefales det å gjennomføre flomfrekvensanalyse for stasjoner i nærheten med lengre serier, og videre benytte resultatene til sammenligning (Hisdal et al., 2013).

Vannføringsdata som brukes ved flomfrekvensanalyse er ofte basert på omregning fra vannstand med utgangspunkt i vannføringskurver. En usikkerhet ved metoden er derfor at vannføringskurvene typisk er ekstrapolert langt utover området som er dekket av vannføringsmålinger (Basberg, 2016). Videre er flomfrekvensanalyse funnet å gi stort rom for subjektive vurderinger og resultatene fra metoden er ofte sprikende (Lundquist, 2016). Valg av ekstremverdifordeling kan anses som en subjektiv vurdering da valget ofte baseres på erfaringer. Lundquist har videre funnet at variasjon i resulterende vannføring for ulike ekstremverdifordelinger øker med økende gjentakintervall, altså oppnås mer sprikende resultat desto høyere gjentakintervallet er.



## 4.2 Formelverk for små nedbørfelt

Formelverket for små nedbørfelt er etablert i forbindelse med NIFS-prosjektet (Stenius et al., 2015b). Formelverket beregner middelflom og vannføring med høyere returperioder direkte på kulminasjonsverdier, og er etablert ved Bayesianske regionale regresjonsanalyser og modellvalg (Stenius et al., 2015a). Middelflom bestemmes ved formel (1) og formel (2) beskriver vekstkurven, som er forholdet mellom middelflom og en flom med vilkårlig returperiode T ( $Q_T/Q_M$ ). Avrenningskart for gjeldene normalperiode kan benyttes for å bestemme middelvannføring.

$$Q_M = 18,97Q_N^{0,864} e^{-0,251\sqrt{A_{SE}}} \quad (1)$$

$$\frac{Q_T}{Q_M} = 1 + 0,308 \cdot q_N^{-0,137} \cdot \frac{[\Gamma(1+k)\Gamma(1-k) - (T-1)^{-k}]}{k} \quad (2)$$

Hvor

$Q_N$  = Nedbørfeltets middelvannføring for gjeldende normalperiode [ $m^3/s$ ]

$A_{SE}$  = Effektiv sjøprosent [%]

$q_N$  = Middelvannføring for gjeldende normalperiode [ $l/s \cdot km^2$ ]

$\Gamma$  = Gammafunksjonen

T = Returperiode

$$k = -1 + \frac{2}{1 + e^{0,391 + 1,54 \cdot \frac{A_{SE}}{100}}}$$

En fordel ved bruk av formelverket er at usikkerheten lar seg kvantifisere i høyere grad samtidig som den reelle usikkerheten ikke nødvendigvis er større enn ved andre metoder. I "Veileder for flomberegninger i små uregulerte nedbørfelt" konkluderer Stenius et al. (2015b) at den største usikkerhetskilden ved denne metoden kommer fra middelflom-regresjonen, hvor usikkerheten (95 % konfidensintervall) fås ved å gange estimatet av middelflommen med 0,56-1,77. Usikkerheten er funnet å øke med økende returperiode, ved returperiode over 100 år ligger usikkerhet på omtrent 0,5-2,0 ganger aktuelt flomestimat,  $Q_T$ .

### 4.3 Den rasjonale metode

Den rasjonale metode er en empirisk modell som anbefales benyttet ved svært små nedbørfelt med liten demping (Stenius et al., 2015b). Vannføring,  $Q$ , beregnes ved formel (3).

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (3)$$

Hvor

- $Q$  = Avrenning [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $C$  = Avrenningskoeffisient [-]
- $i$  = Dimensjonerende nedbørintensitet [ $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ]
- $A$  = Areal av nedbørfelt [ $\text{km}^2$ ]

Dimensjonerende nedbørintensitet bestemmes for et gitt gjentakintervall med varighet lik feltets konsentrasjonstid,  $t_c$ . Intensiteten til nedbørshendelsen bestemmes ved bruk av IVF-kurve. Konsentrasjonstiden avhenger av størrelse på nedbørfeltet, sammen med feltegenskaper som innsjøareal, urbaniseringsgrad og høydeforskjell i feltet. Konsentrasjonstiden for naturlige felt (skogsområder, ubebygget område) beregnes ved formel (4), mens formel (KLIMA2050) brukes ved urbane felt (utbygde felt) (Stenius et al., 2015b).

$$t_c = 0,6 \cdot F_L \cdot H^{-0,5} + 3000 \cdot A_{SE} \quad (4)$$

$$t_c = 0,02 \cdot F_L^{1,15} \cdot H^{-0,39} \quad (5)$$

Hvor

- $F_L$  = Lengde av nedbørfeltet [m]
- $H$  = Høydeforskjell i feltet [m]
- $A_{SE}$  = Effektiv innsjøprosent [%]

Avrenningskoeffisienten,  $C$ , uttrykker mengden nedbør som renner bort som overflatevann innad i et nedbørfelt. Veiledende  $C$ -verdier er gitt i tabell 1, hvorav faktoren varierer fra 0,2 i områder med mye infiltrasjon (skog og dyrket mark) til 0,9 i områder med høy avrenning (urbane strøk og snaufjell).

Tabell 1: Veiledende verdier for avrenningskoeffisient C med ulikt dekke.

Overflatetype	Avrenningskoeffisient
Betong, asfalt, bart fjell, frosset mark	0,6 – 0,9
Grusveger	0,3 – 0,7
Dyrket mark og parkområder	0,2 – 0,4
Skogsområder	0,2 – 0,5

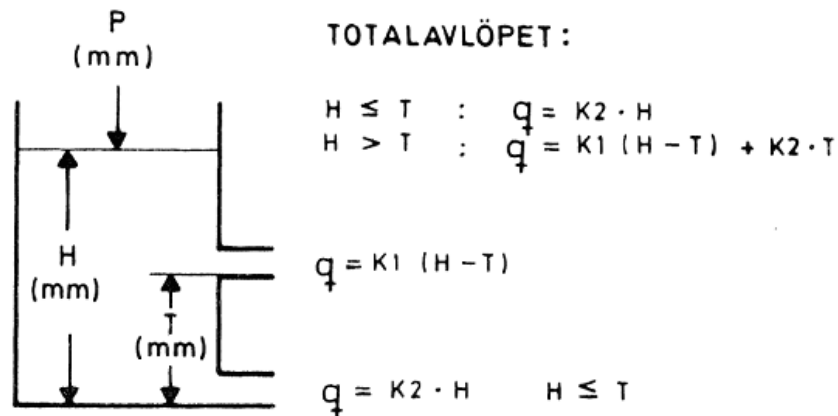
Mengde avrenning avhenger også av metningsgraden i bakken, og avrenningskoeffisienten bør derfor justeres i forhold til nedbørhendelsers varighet og gjentakintervallet det skal beregnes for. Ved nedbør med varighet mindre enn én time bør de lave verdiene i tabell 1 benyttes, mens for nedbør med varighet lenger enn tre timer benyttes de høyere verdiene. Det anbefales også en økning i avrenningskoeffisienten ved økende gjentakintervall, da større del av nedbøren vil gå til avrenning (Stenius et al., 2015b).

Den største usikkerheten ved bruk av den rasjonale metode ligger i valg av avrenningskoeffisienten, C. Verdien vil som regel variere innad i nedbørfeltet med arealbruk og hvor vannmettet bakken er, men antas likevel konstant gjennom hele nedbørhendelsen. Koeffisienten tar altså ikke hensyn til at grunnen blir mer mett med vann underveis. Samtidig bestemmes koeffisienten mye ut fra subjektive vurderinger, og varierer derfor avhengig av hvem som utfører beregningene (Stenius et al., 2015b).

#### 4.4 PQRUT

PQRUT er en nedbør-avløpmodell som gir en god beskrivelse av et flomforløp uten en stor mengde modellparametere. Metoden er anbefalt ved små nedbørfelt (Stenius et al., 2015a). Flommodulen i PQRUT er en lineær karmodell, der avløpet antas å være proporsjonalt med innholdet. Avrenning beregnes ved å lede nedbøren gjennom et kar modellert med to utløp, illustrert i figur 3. Reaksjonen til nedbørfeltet øker ofte kraftig når avrenningen når et gitt nivå, derfor er det innført et ekstra utløp ved terskelhøyde, T, i karet (Andersen et al., 1983). Modellen har tre parametere:

- K1 - Tømmekonstant for øvre nivå
- K2 - Tømmekonstant for nedre nivå
- T - Terskelhøyde, skille mellom øvre og nedre nivå



Figur 3: Illustrasjon av flommodul i PQRUT (Andersen et al., 1983).

Total avrenning,  $Q_{tot}$ , bestemmes ved formel (6). Det er tatt utgangspunkt i denne formelen for å finne parameterne ved kalibrering, hvorav  $Q_{tot}$  sammenlignes med  $Q_{obs}$ . Parameterne som gir flomverdier som samsvarer best velges videre.

$$Q_{tot} = K_1 \cdot (H - T) + K_2 \cdot H \quad (6)$$

Ved bruk av nedbør-avløpsmodeller som PQRUT for dimensjonerende flomberegning settes normalt full metning som initialtilstand (Stenius et al., 2015b). Dette innebærer at initialverdi,  $H$ , er større enn terskelverdi,  $T$ . Nedre tømmekonstant,  $K_2$ , kan også bestemmes med utgangspunkt i konsentrasjonstiden til å være  $K_2 = 1 / T_c$  (Stenius et al., 2015b). Ved manglende observasjonsdata kan parameterne bestemmes ved et sett ligninger. Andersen et al. (1983) presenterer ligninger som beskriver parameterne  $K_1$ ,  $K_2$  og  $T$  med utgangspunkt i feltparametere, sammen med gyldighetsintervall for bruk av ligningene. Ligningene er presentert nedenfor ved formel (7), (8) og (9).

$$K_1 = 0,0135 + 0,00268 \cdot H_L - 0,01665 \cdot \ln(A_{SE}) \quad (7)$$

$$K_2 = 0,009 + 0,21 \cdot K_1 - 0,00021 \cdot H_L \quad (8)$$

$$T = -9,0 + 4,4 \cdot K_1^{-0,6} + 0,28 \cdot q_N \quad (9)$$

Hvor

$$H_L = \text{Relieff forhold } (H_{50}/L_F) \text{ [m/km]}$$

$$H_{50} = \text{Høydeforskjell i meter mellom 25 og 75 \% passasjen på feltets hypsografiske kurve}$$

- $L_F$  = Feltaksens lengde [m]  
 $A_{SE}$  = Effektiv innsjøprosent [%]  
 $q_N$  = Midlere spesifikt årsavløp 1961-1990 [ $l/s \cdot km^2$ ]

Metoden har også en utviklet snørutine som gjør det mulig å simulere sammensatte regn- og smelteflommer. For små nedbørfelt er det funnet at de største flommene i hovedsak genereres av regn (Stenius et al., 2014), derfor beskrives ikke snørutinen mer inngående. En beskrivelse av snørutinen er gitt av Midttømme et al. (2011) i ”Retningslinjer for flomberegninger”.

Usikkerhet ved bruk av flommodulen PQRUT skyldes ofte manglende observasjonsdata for nedbør og vannføring, slik at modellparametere må beregnes ved ligninger (Stenius et al., 2015b). Ved tilgjengelig observasjonsdata vil det også være usikkerhet ved kalibrering da det tas mange subjektive vurderinger, spesielt ved fastsetting av initialverdier (Lundquist, 2016). Videre simuleres flom på grunnlag av at nedbør med et bestemt gjentaksintervall medfører flom med tilsvarende gjentaksintervall. Nedbørfeltets geografiske forhold og tilstand (tørt, fuktig) når nedbør faller vil ha stor betydning for størrelsen på generert vannføring. Nedbør med bestemt gjentaksintervall vil derfor ikke nødvendigvis generere flom med samme gjentaksintervall. Stenius og Glad (2015) har også funnet at metoden har en tendens til å underestimere avrenning ved små felt og overestimere avrenning ved store nedbørfelt.

## **4.5 Design hyetogram**

Opplysninger som ligger i en IVF-kurve kan omdannes til et symmetrisk regnhyetogram med utgangspunkt i varighet lik konsentrasjonstid. Alternativt kan hyetogrammet konstrueres basert på observert ekstremnedbør. Det er fordelaktig å bruke hyetogram framfor ”kasseregner” da sterke nedbørhendelser ofte har meget høy toppintensitet en tid etter regnet starter, regnintensiteten er sjelden konstant ved slike nedbørhendelser (Lindholm et al., 2003).

### **4.5.1 Design hyetogram basert på IVF-kurve**

Lindholm et al. (2003) gir en beskrivelse av prosedyren for å konstruere design hyetogram med utgangspunkt i IVF-kurve og varighet lik konsentrasjonstiden ( $t_c$ ). Hyetogrammet antas å være symmetrisk om egen midtakse. Hensiktsmessig beregningssteg er omtrent 5 minutter da kortere tidssteg vil gi meget høy spissintensitet (Lindholm et al., 2003). På bakgrunn av dette hentes nedbørintensitet fra IVF-kurve ved 10 minutters tidsintervall for regnvarighet. Ved varighet lik

10 minutter oppnås størst nedbørintensitet, dette utgjør dermed topp og midtakse av hyetogrammet. Neste nivå er gitt ved  $I_{20}-I_{10}$ , bestemt ved formel (10). Nivå for nedbørintensitet beregnes fram til varighet  $t_2 \approx$  konsentrasjonstiden.

$$I_{t_2} - I_{t_1} = \frac{(I_{t_2} \cdot t_2 - I_{t_1} \cdot t_1)}{t} \quad (10)$$

Hvor

$I$  = Nedbørintensitet [l/s·ha]

$t$  = Tidssteg [min]

$t_1$  = Minste regnvarighet [min]

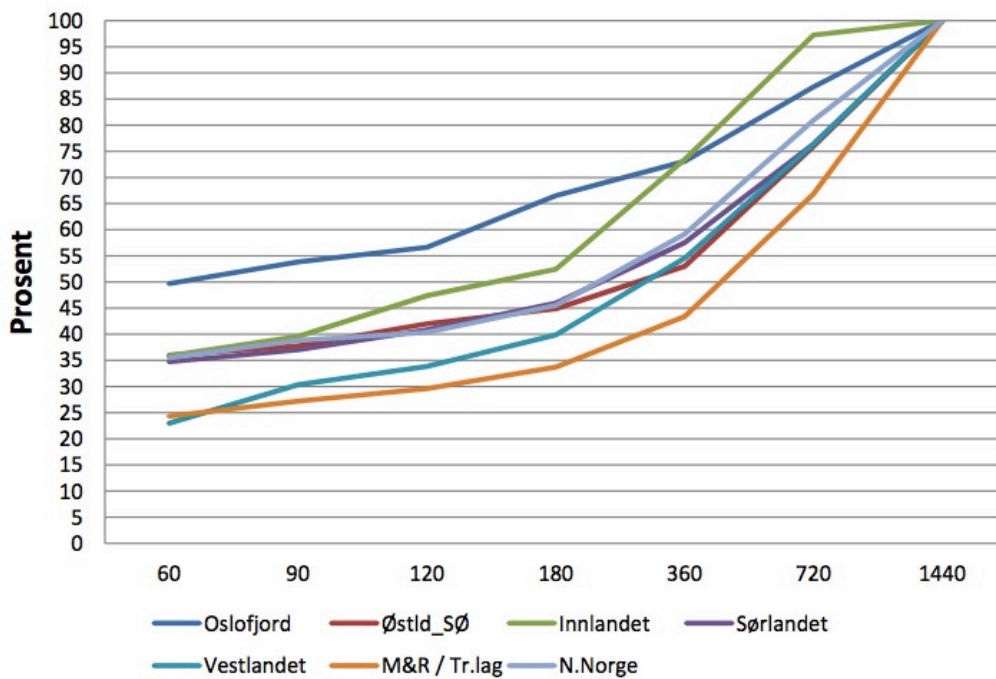
$t_2$  = Største regnvarighet [min]

Resultatene benyttes videre til å konstruere et symmetrisk design hyetogram med beregningssteg 5 minutter. Symmetri oppnås ved at resultatene plasseres i stigende rekkefølge fram til varighet lik  $t_c/2$ , hvorav samme verdier benyttes i synkende rekkefølge fram til varighet er tilnærmet lik  $t_c$ . Maksimal nedbørintensitet er dermed gitt i to søyler med høyde lik  $I_{10}$  ved midtaksen av hyetogrammet.

Hyetogram kan kontrolleres ved å vurdere samsvar mellom totalt nedbørvolum fra design hyetogram og nedbørvolum bestemt fra IVF-kurve ved varighet lik konsentrasjonstid.

#### **4.5.2 Design hyetogram basert på ekstremnedbør**

Stenius et al. (2015b) gir en beskrivelse av hyetogram konstruert basert på observerte ekstremnedbørverdier. Resultater fra analyser utført av Meteorologisk Institutt i NIFS-prosjektet gir et godt grunnlag for å velge dimensjonerende nedbør for varigheter opp mot 24 timer (Stenius et al., 2015b). Gjentakintervall for maksimale døgnverdier bestemmes typisk ved flomfrekvensanalyse.



Figur 4: Nedbør ved ulik varighet i prosent av nedbør ved et døgn (Stenius et al., 2015b).

Prosentandeler for å utarbeide grovestimat av nedbør med varighet < 24 timer bestemmes med utgangspunkt i figur 4. Videre konstrueres et symmetrisk hyetogram.

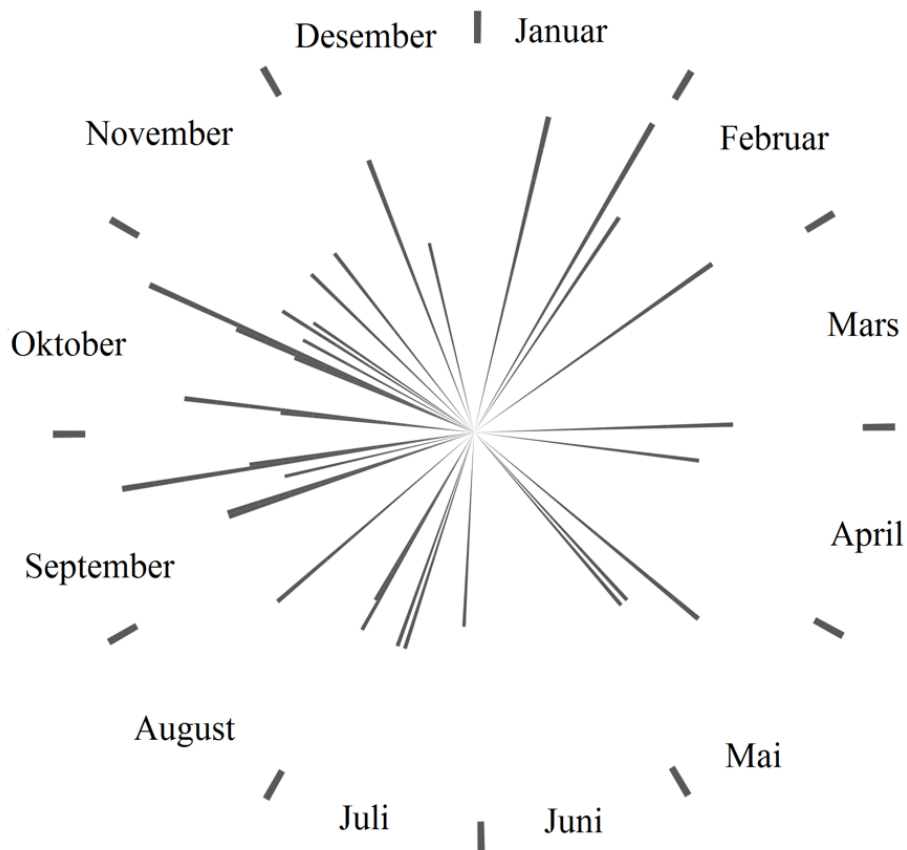




## 5 VURDERING AV HYDROLOGISKE DIMENSJONERINGSMETODER

Hydrologiske dimensjoneringsmetoder er ofte avhengig av at antagelser om initialtilstand blir gjort, at kalibrering gjennomføres og at representativ data er tilgjengelig (Stenius og Glad, 2015). Faktorene kan gi store usikkerheter i beregningene, hvorav ulike usikkerhetsfaktorer er gjeldende for de ulike dimensjoneringsmetodene. Vurdering av hydrologiske dimensjoneringsmetoder er gjennomført med utgangspunkt i data hentet fra observasjonsområde presentert i kapittel 3 og teori gitt i kapittel 4.

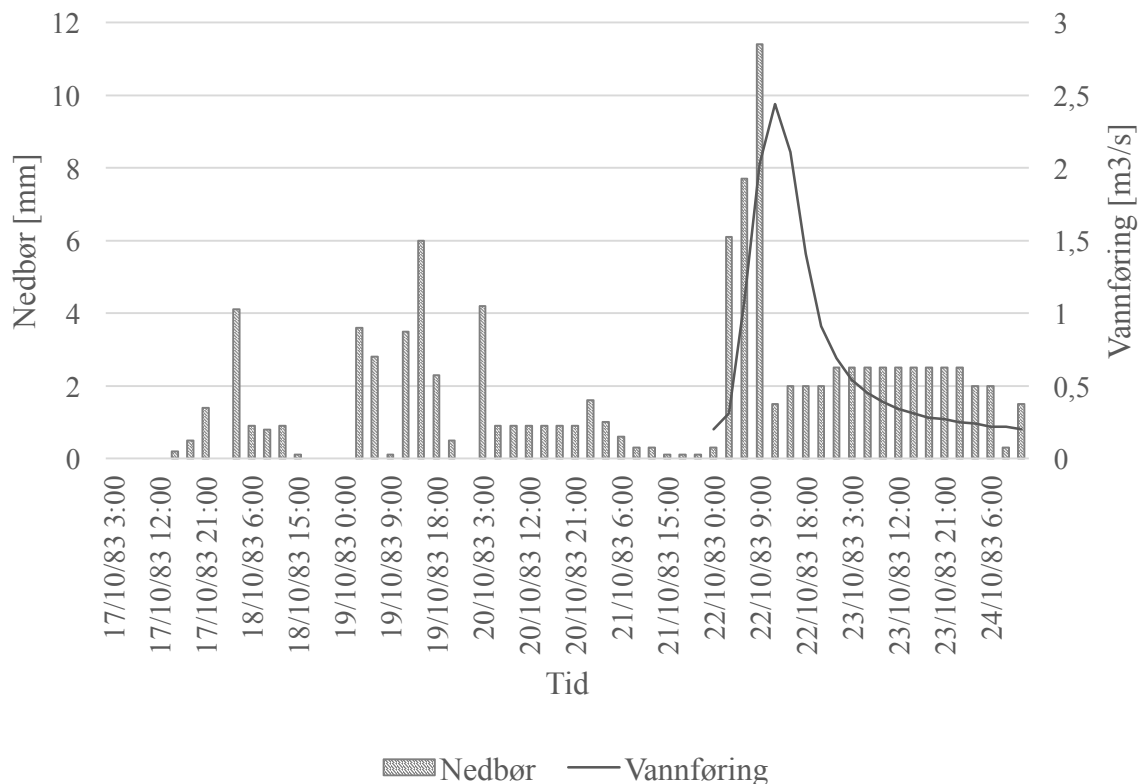
Flomdata med 3-timers og 30-minutters tidsintervall er hentet fra Svarttjønnbekken. Videre er vannføringsverdier større enn  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  identifisert. Alle flomtopper større enn  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  over året er presentert i figur 5, uavhengig av hvilket årstall flomtoppen inntreffer. Oversikt over dato og størrelse på flomtoppene er gitt i vedlegg 2.



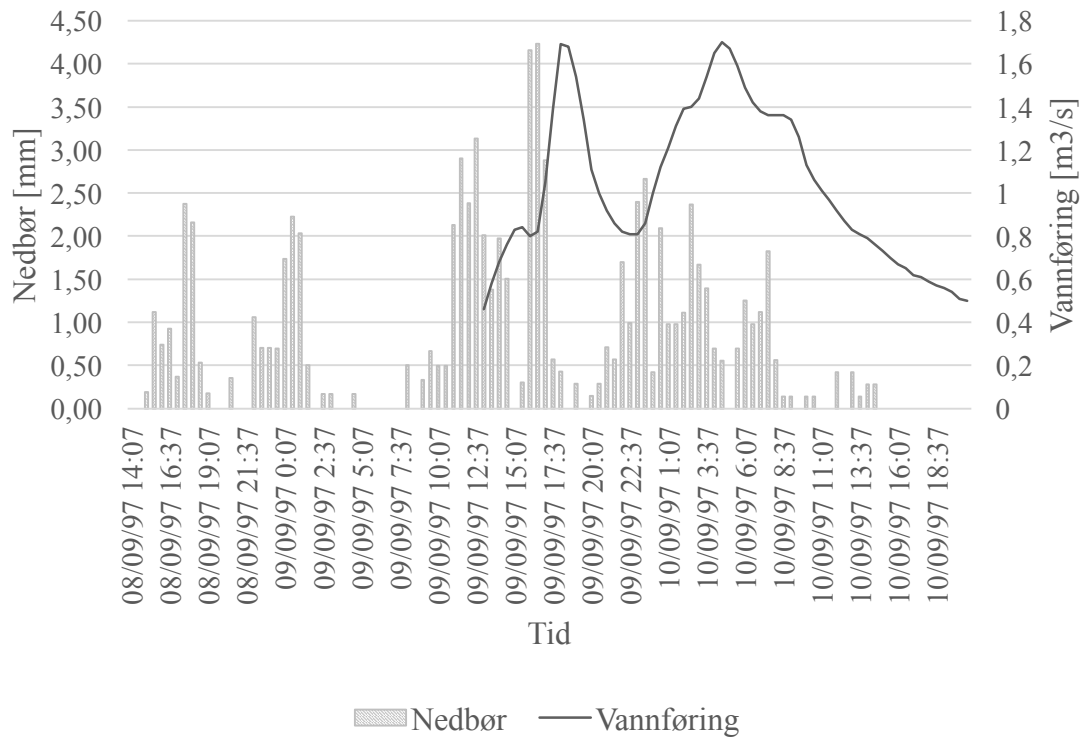
Figur 5: Uavhengige flomtopper ved Svarttjønnbekken.

Fra figur 5 er det gitt at flertallet av flomtopper inntreffer på høsten. I rapport for klima i Norge 2100 konkluderer Hanssen-Bauer et al. (2015) med at regnflommene vil bli større og komme oftere, mens smelteflommer vil bli færre og mindre, hvorav utviklingen er sett tilbake til år 1971. Dette samsvarer med fordelingen av flomtopper ved Svarttjønnbekken da regnflommer ofte inntreffer på høst mens smelteflommer er mest aktuelt på vår.

Flomtoppene er videre satt i sammenheng med nedbør for å vurdere hvordan ulike nedbørførløp genererer flom. Nedbørdata er hentet fra stasjon ved Svarttjønnbekken. Flomhendelser er valgt med utgangspunkt i tilstrekkelig god nedbørdata sammenfallende med god flomdata. Det er valgt 8 flomhendelser med 3-timers intervall og 5 hendelser med 30-minutters intervall. Én flomhendelse med 3-timers tidsintervall og én med 30-minutters tidsintervall er presentert grafisk i henholdsvis figur 6 og figur 7, hvorav resterende flomhendelser er gitt i vedlegg 3 og vedlegg 4.



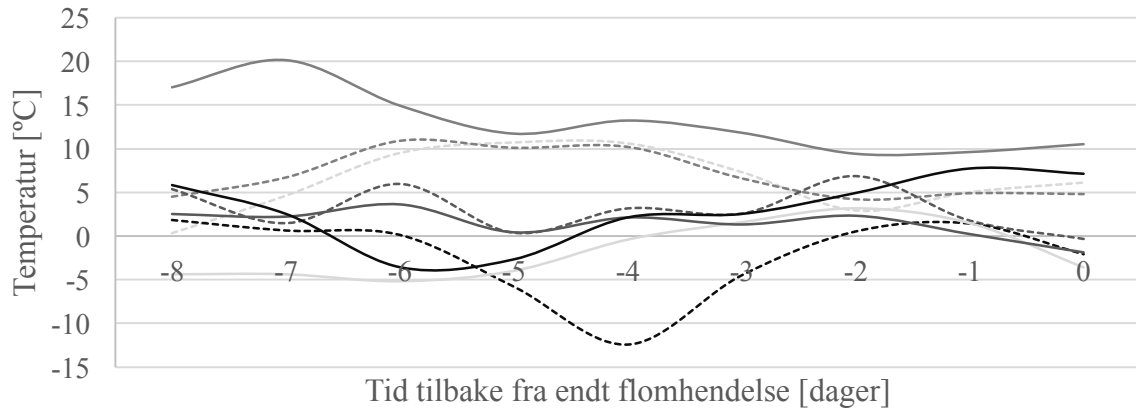
Figur 6: Grafisk framstilling av flomhendelse fra oktober 1983, 3-timers data.



Figur 7: Grafisk framstilling av flomhendelse fra september 1997, 30-minutters data.

Faktorer som metningsgrad i grunnen, lufttemperatur og snøfordeling har også stor innvirkning på flomfordelingen. Figur 8 og figur 9 presenterer temperaturer 9 dager tilbake fra flomtopp for de 13 utvalgte flomhendelsene. Temperatur fra figurene kan benyttes til å indikere om nedbør kommer i form av regn eller snø. Temperatur-verdier for hver hendelse er også gitt i tabell i vedlegg 5.

Figurene viser at temperaturen er rundt 0 °C for flere av hendelsene, og at det dermed er store sannsynligheter for at noe nedbør kommer i form av snø. Dette gjelder hendelsene fra 1987 og 1988 med 3-timers tidsintervall og hendelsene fra februar 1998 og 1999 med 30-minutters tidsintervall.



- - - - oktober 1983    - - - - september 1984    - - - - oktober 1985  
 - - - - desember 1987    - - - - november 1988    - - - - juli/august 1989  
 - - - - mars/april 1990    - - - - oktober 1993

*Figur 8: Lufttemperatur for flomhendelser med 3-timersintervall.*



- - - - september 1997    - - - - februar 1998    - - - - april 1998  
 - - - - februar 1999    - - - - juli 1999

*Figur 9: Lufttemperatur for flomhendelser med 30-minutterstintervall.*

Snøfordeling i området kan også bestemmes med utgangspunkt i snøpute-data for Svarttjønnbekken. Data er tilgjengelig fram til 1994, og kan derfor kun benyttes for hendelsene med 3-timers tidsintervall. Dataen indikerer at snøsmelting er aktuelt for hendelsene i 1985 og 1993. Snøakkumulering er aktuelt ved hendelsene i 1983, 1987 og 1988, som samsvarer med resultat fra figur 8 og figur 9. For flomhendelsen i 1983, gitt i figur 6, er snøakkumulering aktuelt ved slutten av flomperioden. Dette kan forklare hvorfor relativt store nedbørmengder ved slutten av hendelsen ikke genererer flom.

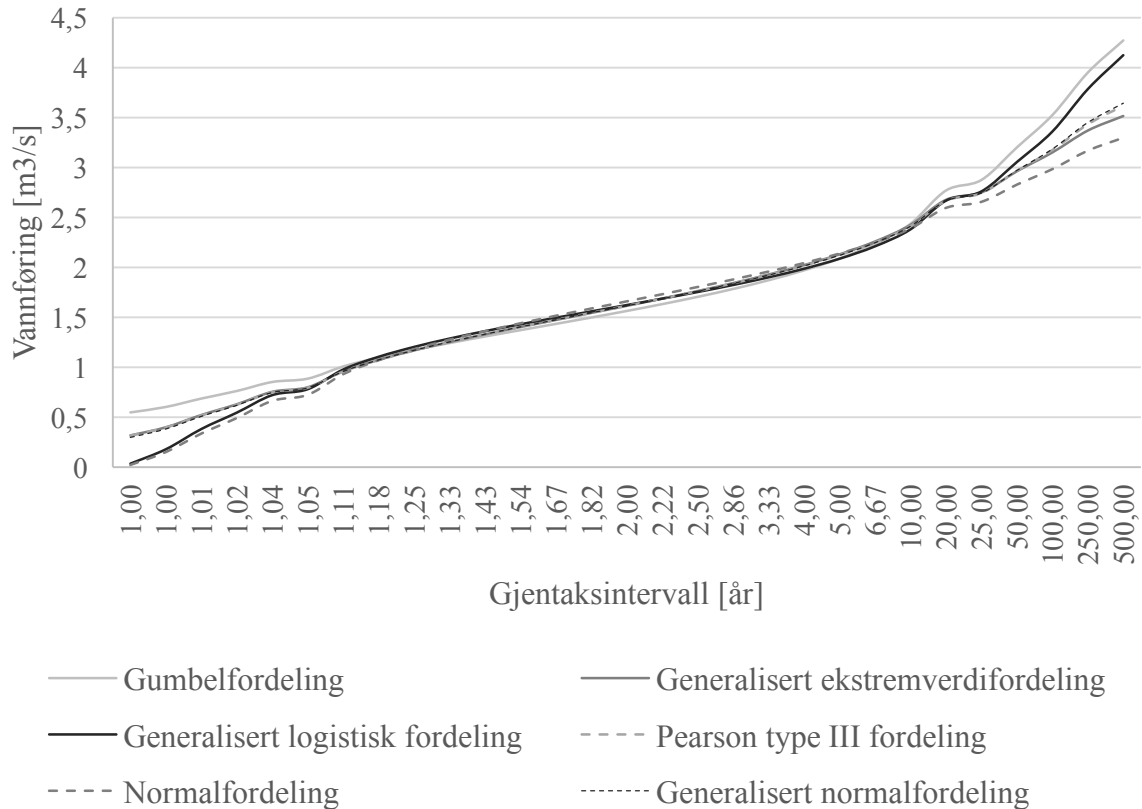
Videre vurderes hydrologiske dimensjoneringsmetoder med utgangspunkt i data fra Svarttjønnbekken. Vurderinger av observert nedbør opp mot design nedbør er også gjort for å undersøke om design nedbør er representativt for Svarttjønnbekken. Design nedbør legges til grunn for beregninger ved nedbør-avløpsmodeller og er dermed en aktuell feilkilde.

## **5.1 Flomfrekvensanalyse**

Gjentaksintervall for vannføring og nedbør vurderes ved ekstremverdiberegninger, hvor årlige maksimale verdier legges til grunn. Flomfrekvensanalyse er gjennomført i R, hvor input er gitt ved årlig maksimal flom og nedbør, presentert i henholdsvis vedlegg 6 og vedlegg 7. R-scriptet som benyttes til å gjennomføre flomfrekvensanalyse er gitt i vedlegg 8.

Gjentaksintervall er bestemt ved seks ulike fordelingsfunksjoner; gumbelfordeling, generalisert ekstremverdi fordeling, generalisert logistisk fordeling, pearson type III fordeling, generalisert normalfordeling og normalfordeling. Resultat for vannføring og nedbør er gitt i tabellform i henholdsvis Vedlegg 9 og vedlegg 10. Ved flomfrekvensanalyse av data med kortere tidsintervall oppnås noe høyere verdier for vannføring. Dette kan forklares med at kortere tidssteg vil ta med flomtopper i større grad.

Gjentaksintervall for vannføring med 3-timers tidsintervall er presentert grafisk i figur 10. Fra figuren kan det konkluderes med at det er liten variasjon i vannføring for de ulike fordelingsfunksjonene ved gjentaksintervall mellom 1,2-15 år, men at variasjonene øker med økende gjentaksintervall ved  $T > 15$  år.



Figur 10: Flomfrekvensanalyse ved seks ulike fordelingsfunksjoner for 3-timers data.

Observasjonsdata ved Svarttjønnbekken har serier som er kortere enn anbefalt ved flomfrekvensanalyse, da det anbefales dataserier lenger enn 30 år. Dette gjelder spesielt for nedbør. Flomfrekvensanalyse og gumbelfordelingen er benyttet til tross for manglende data. Dette gir usikkerheter i resultatene da enkelte storflommer/ekstremnedbørhendelser kan påvirke resultatet betraktelig.

### 5.1.1 Gjentaksintervall for observerte flomhendelser

Vannføringsdata med 3-timers tidsintervall er tilgjengelig totalt 43 år for Svarttjønnbekken. Dette tilsier at både to- og treparameterfordeling kan brukes. Generalisert ekstremverdi fordeling (GEV) benyttes da denne fordelingen vanligvis er brukt i Norge (Stenius et al., 2015b). Flomdata med 30-minutters tidsintervall er tilgjengelig totalt 21 år. På bakgrunn av at denne dataserien er kortere benyttes Gumbelfordelingen til å bestemme gjentaksintervall. Gjentaksintervall for hver enkelt flomhendelse er funnet ved interpolasjon av verdier i tabellene i vedlegg 9, hvorav resultatet er presentert i tabell 2.

Tabell 2: Gjentakintervall for flomhendelser ved Svarttjønnbekken.

	Dato	$Q_{\text{maks}}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Gjentaksintervall, T (GEV)
<i>3-timers tidsintervall</i>	<b>Oktober 1983</b>	2,44	10,8
	<b>September 1984</b>	2,08	4,5
	<b>Oktober 1985</b>	1,53	1,8
	<b>Desember 1987</b>	2,22	6,2
	<b>November 1988</b>	1,8	2,7
	<b>Juli/August 1989</b>	1,75	2,5
	<b>Mars/April 1990</b>	2,11	4,8
	<b>Oktober 1993</b>	1,55	1,8
<i>30-minutters tidsintervall</i>	<b>September 1997</b>	1,70	2,4
	<b>Februar 1998</b>	2,04	3,7
	<b>April 1998</b>	1,57	2,1
	<b>Februar 1999</b>	2,15	4,2
	<b>Juli 1999</b>	1,73	2,5

Fra tabell 2 kan det konkluderes med at gjentakintervall for de utvalgte flomhendelsene er relativt korte, mellom 1,8 – 10,8 år. Videre er gjentakintervall for hendelser med 30-minuttersdata generelt kortere enn hendelser fra 3-timersdata. De korte gjentakintervallene ved 30-minuttersdata kan skyldes at dataserien ikke er tilstrekkelig lang, slik at enkelte storflommer kan påvirke frekvensfordelingen betraktelig og føre til lavere gjentakintervall. Flomhendelser markert med grått har gjentakintervall tilnærmet lik 2 og 5 år, for henholdsvis 30-minuttersdata og 3-timersdata. Disse hendelsene legges til grunn ved vurdering av nedbør-avløpsmodell.

### 5.1.2 Gjentakintervall for observert nedbør

Nedbørdata med 3-timers tidsintervall er tilgjengelig totalt 26 år for Svarttjønnbekken. Ved 30-minutters tidsintervall er nedbørdata tilgjengelig totalt 16 år. På bakgrunn av de korte dataseriene bestemmes gjentakintervall for nedbørhendelsene ved gumbelfordelingen. Gjentakintervall for utvalgte hendelser er bestemt ved interpolasjon av verdier i tabellene i vedlegg 10, hvorav resultatet er presentert under i tabell 3.

Tabell 3: Gjentakintervall for nedbør for flomhendelser med 3-timers data.

	<b>Dato</b>	<b>Maks nedbørvolum, 3 timer [mm]</b>	<b>Gjentaksintervall, T (GUM)</b>
<i>3-timers tidsintervall</i>	<b>Oktober 1983</b>	11,4	1,2
	<b>September 1984</b>	7,8	1,0
	<b>Oktober 1985</b>	12,6	1,3
	<b>Desember 1987</b>	11,6	1,2
	<b>November 1988</b>	7,3	1,0
	<b>Juli/August 1989</b>	10,2	1,1
	<b>Mars/April 1990</b>	22,1	5,1
	<b>Oktober 1993</b>	8,8	1,0
<i>30-minutters tidsintervall</i>	<b>September 1997</b>	4,2	1,2
	<b>Februar 1998</b>	2,7	1,0
	<b>April 1998</b>	2,3	1,0
	<b>Februar 1999</b>	4,9	1,3
	<b>Juli 1999</b>	6,0	1,4

Resultatet i tabell 3 viser at gjentakintervall for nedbør i forkant av utvalgte flomhendelsene generelt er lave. Dette tilsier at det ikke nødvendigvis er ekstreme nedbørhendelser som genererer flomtopper, heller langvarige nedbørhendelser med lavere regnintensitet. Faktorer som metningsgrad i grunnen og snøforhold spiller en vesentlig rolle.

## 5.2 Formelverk for små nedbørfelt

NEVINA-rapport, gitt i vedlegg 1, gir nødvendige parametere for å utføre beregninger med utgangspunkt i formelverk. Vekstkurven for hver flomhendelse bestemmes ved formel (1), og middelflom for Svarttjønnbekken bestemmes ved formel (2) til å være 2,03. Maks vannføring ved gitt gjentakintervall, T, for hver flomhendelse bestemmes ved å multiplisere vekstkurven med middelflom. Videre sammenlignes disse verdiene med observert maksimal vannføring,  $Q_{maks}$ , og forholdet mellom  $Q_{maks}$  og observert  $Q_{middel}$  for den aktuelle dato. Prosentvis avvik bestemmes med utgangspunkt i at observert verdi ( $Q_{maks}$  og  $Q_{maks}/Q_{middel}$ ) er korrekt verdi. Relativ feil er lik absolutt feil dividert med korrekt størrelse. Resultatene presenteres i tabell 4, hvor 3-timersdata er gitt i de 8 første radene og 30-minutterdata i de 5 etterfølgende radene.



Tabell 4: Vurdering av formelverk for små nedbørfelt ved utvalgte flomhendelser.

Dato	$Q_{maks}$ [m <sup>3</sup> /s]	Gjentaks- intervall, T	$Q_{maks}/$ $Q_{middel}$	$Q_T/Q_M$ ved formelverk for små nedbørfelt	$Q_T$	% - avvik, maksimal vannføring	% - avvik, vekstkurve
Oktober 1983	2,44	10,8	1,858	1,497	3,04	24,6	-19,4
September 1984	2,08	4,5	1,427	1,211	2,46	18,2	-15,1
Oktober 1985	1,53	1,8	1,977	0,890	1,81	18,2	-55,0
Desember 1987	2,22	6,2	1,817	1,314	2,67	20,2	-27,7
November 1988	1,8	2,7	1,134	1,042	2,12	17,6	-8,1
Juli/August 1989	1,75	2,5	1,461	2,585	2,06	17,8	-30,5
Mars/April 1990	2,11	4,8	3,060	1,016	2,50	18,5	-59,7
Oktober 1993	1,55	1,8	2,156	1,232	1,81	16,7	-58,7
September 1997	1,70	2,4	1,570	1,001	2,03	19,6	-36,2
Februar 1998	2,04	3,7	1,455	1,147	2,33	14,2	-21,1
April 1998	1,57	2,1	2,020	0,952	1,93	23,1	-52,9
Februar 1999	2,15	4,2	2,044	1,189	2,41	12,3	-41,8
Juli 1999	1,73	2,5	1,426	1,016	2,06	19,2	-28,8

Beregnete maksimale vannføringsverdier er funnet å være noe høyere enn observerte verdier. Dermed kan metoden anses som konservativ.

I rapporten ”Sammenligning av metoder for flomberegninger i små uregulerte nedbørfelt” presenterer Stenius et al. (2015a) resultat fra NIFS-formelverk ved 168 utvalgte målestasjoner/felt i Norge. Vekstkurven  $Q_5/Q_M$  for Svarttjønnbekken er funnet å være 1,24. Radene markert med grått i tabell 4 har gjentaksintervall tilnærmet lik 5 år. Vekstkurven for hendelsene hentet fra september 1984 og februar 1999 stemmer godt overens med resultatet fra rapporten.

### **5.3 Sammenligning av nedbør ved ulike nedbørstasjoner**

Beregninger ved den rasjonale metode og PQRUT er avhengig av nedbørdata i form av IVF-kurver og design hyetogram. Målestasjonene ved Voll og Risvollan er nærmeste målestasjoner til Svarttjønnbekken med tilgjengelige IVF-kurver, hvorav begge stasjoner ligger i Trondheim. Stasjonene ligger med omtrent samme avstand til Svarttjønnbekken, tilnærmet 18 km. Lokale forhold som topografi og avstand fra kysten kan føre til store variasjoner i klimaet over små avstander (Hanssen-Bauer et al., 2015). På bakgrunn av dette vurderes lokale variasjoner i nedbør da dette kan være en potensiell feilkilde.

Observert nedbørdata er hentet fra flere nedbørstasjoner i Trondheimområdet da datatilgjengelig ved ulike stasjoner varierer over perioden. Tabell 5 og tabell 6 presenterer nedbørvolum ved Svarttjønnbekken og Trondheim for hver flomhendelse med henholdsvis 3-timers og 30-minutters tidsintervall, samt prosentvis avvik mellom målestasjonene. Alle nedbørvolum er gitt i døgnverdier.

Tabell 5: Sammenligning av totalt nedbørvolum for stasjoner, basert på 3-timers data.

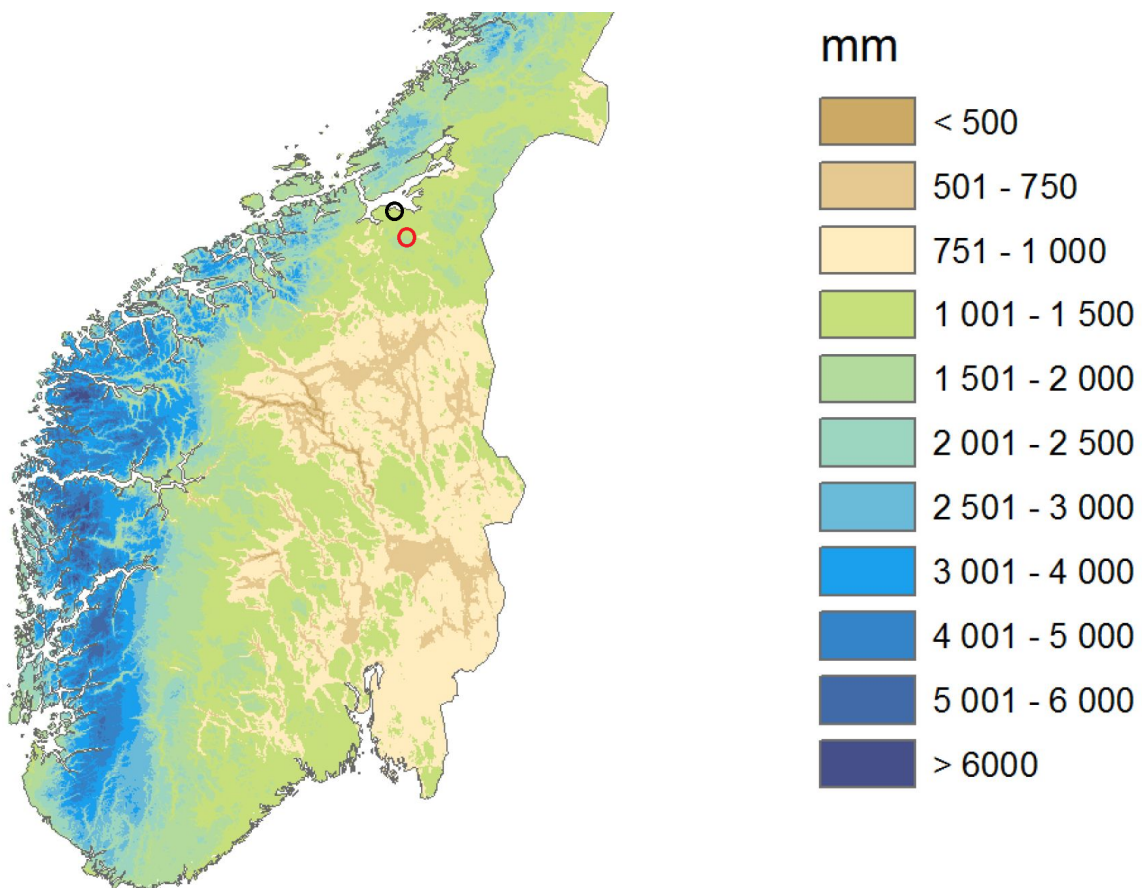
Dato	Totalt nedbørvolum for Svarttjønnbekken [mm]	Totalt nedbørvolum for målestasjon i Trondheim [mm]			% - Avvik
		Øvre leirfoss	Nidarvoll	Leinstrand	
Oktober 1983	102,7	87			-15,3
September 1984	111,3	90,5			-18,7
Oktober 1985	112,4	123,2			9,6
Desember 1987	121,6	141	142,1		16,0
November 1988	170,5		137,1		-19,6
Juli/August 1989	105,9		60,7		-42,7
Mars/April 1990	104,2		106,1		1,8
Oktober 1993	99,3			67,7	-31,8

Tabell 6: Sammenligning av totalt nedbørvolum for stasjoner, basert på 30-minutters data.

Dato	Totalt nedbørvolum for Svarttjønnbekken [mm]	Totalt nedbørvolum for Voll målestasjon i Trondheim [mm]		% - avvik
September 1997	85,6	58,5		-31,7
Februar 1998	56,5	43,6		-22,8
April 1998	20,2	10,4		-48,5
Februar 1999	61,7	36,6		-40,7
Juli 1999	60,1 *	31,8		-47,1

Fra tabell 5 og tabell 6 er det gitt at nedbørvolum ved Svarttjønnbekken konsekvent er høyere enn nedbørvolum i Trondheimområdet. Prosentvis avvik mellom Svarttjønnbekken og Trondheim er funnet å være betydelig. Det er også funnet å være store variasjoner i prosentvis avvik avhengig av hvilken stasjon i Trondheimsområdet det sammenlignes med. Dette indikerer at det også er store variasjoner innad i Trondheimsområdet.

Kart som presenterer normal årsmiddelnedbør i Norge for perioden 1971-2000 er gitt i figur 11, hvor Trondheim og Svarttjønnbekken er markert i henholdsvis sort og rødt. Figuren bekrefter at området rundt Svarttjønnbekken har større nedbørvolum sammenlignet med Trondheim.



Figur 11: Årsmiddelnedbør for Norge i perioden 1961-2000 (Norsk klimaservicesenter).

På bakgrunn av resultatene i tabell 5 og tabell 6, samt figur 11 benyttes IVF-kurve ved stasjonen med størst nedbørvolum til videre beregninger. IVF-kurve for Risvollan og Voll er gitt i henholdsvis vedlegg 11 og vedlegg 12. Nedbørintensiteten er funnet å være noe lavere for stasjonen ved Risvollan. Totalt nedbørvolum ved varighet lik konsentrasjonstiden og gjentaksintervall 5 år for Risvollan og Voll er bestemt til henholdsvis 20,5 og 21,2 mm. Dermed benyttes IVF-kurve hentet fra Voll ved videre beregninger.

#### 5.4 Den rasjonale metode

Avrenningskoeffisient,  $C$ , for Svarttjønnbekken antas å være lik 0,35 med utgangspunkt i veiledende verdier gitt i tabell 1. Konsentrasjonstid er beregnet ved formel (4), som gir  $t_c = 126,64$  minutter. Fra IVF-kurve ved Voll er regnintensitet ved 2- og 5-års gjentaksintervall bestemt til å være henholdsvis 20 og 30 l/s·ha. Arealet til nedbørfeltet for Svarttjønnbekken er funnet å være 3,5 km<sup>2</sup>. Vannføring for Svarttjønnbekken med 2 og 5 års gjentaksintervall beregnes ved den rasjonale metode, gitt i formel (3). Resultatet er gitt i tabell 7 sammen med vannføring bestemt ved flomfrekvensanalyse til sammenligning. Sammenligningen viser en betydelig overestimering ved den rasjonale metode, hvor prosentvis avvik er over 50 % ved både 2- og 5 års gjentaksintervall.

Tabell 7: Resultat ved den rasjonale metode for Svarttjønnbekken.

Gjentaksintervall	Vannføring ved den rasjonale metode	Vannføring ved flomfrekvensanalyse	% - avvik
2 år	2,70	1,61	67,7
5 år	3,40	2,13	59,6

Den største usikkerheten ved den rasjonale metode ligger i avrenningskoeffisienten, derfor beregnes videre nødvendig  $C$ -verdi for å oppnå observerte vannføringsverdier. Dette gjøres ved at den rasjonale metode omformes, slik at  $C = Q / (i \cdot A)$ . Nedbørintensitet er hentet fra IVF-kurve for Voll ved varighet lik konsentrasjonstid og gjentaksintervall gitt for hver enkelt hendelse. Resultatene er gitt i tabell 8.

Tabell 8: Nødvendig avrenningskoeffisient for observerte flomhendelser.

	<b>Dato</b>	<b>Q<sub>maks</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Gjentaks- intervall [år]</b>	<b>Regnintensitet, IVF-kurve [l/s·ha]</b>	<b>Avrennings- koeffisient, C</b>
<i>3-timers tidsintervall</i>	<b>Oktober 1983</b>	2,44	10,8	35	0,225
	<b>September 1984</b>	2,08	4,5	28	0,220
	<b>Oktober 1985</b>	1,53	1,8	20	0,208
	<b>Desember 1987</b>	2,22	6,2	30	0,219
	<b>November 1988</b>	1,80	2,7	22	0,234
	<b>Juli/August 1989</b>	1,75	2,5	22	0,227
	<b>Mars/April 1990</b>	2,11	4,8	29	0,215
	<b>Oktober 1993</b>	1,55	1,8	20	0,257
<i>30- minutters tidsintervall</i>	<b>September 1997</b>	1,70	2,4	21	0,221
	<b>Februar 1998</b>	2,04	3,7	26	0,233
	<b>April 1998</b>	1,57	2,1	20	0,214
	<b>Februar 1999</b>	2,15	4,2	28	0,228
	<b>Juli 1999</b>	1,73	2,5	21	0,225

Fra tabellen er det gitt at gjennomsnittlig avrenningskoeffisient  $C \approx 0,226$  for 3-timersdata og  $C \approx 0,224$  for 30-minuttersdata. Dette er en relativt lav verdi for koeffisienten, som tilsier høy infiltrasjonsevne. Fra NEVINA-rapporten, presentert i vedlegg 1 er det gitt at nedbørfeltet for Svarttjønnbekken består av 81,7 % skog og 15,1 % myr. Dette bekrefter at feltet vil ha høy infiltrasjonsevne. Fra tabell 8 kan det også konkluderes at det er liten variasjon i avrenningskoeffisienten for de ulike flomhendelsene. Dette tilsier at koeffisienten varierer lite med metningsgraden i grunnen, og holder seg tilnærmet stabil uavhengig av nedbørhendelsers varighet og gjentaksintervall.

Mer lokalt nedbørdata ville gitt høyere regnintensitet da Svarttjønnbekken er funnet å ha større nedbørvolum enn Voll. Dette ville videre gitt høyere verdier for vannføring,  $Q$ , og en større overestimering. Varighet lenger enn konsentrasjonstiden ville til gjengjeld gitt lavere nedbørintensiteten, og videre mindre overestimat av vannføring.

## **5.5 Design hyetogram**

Design hyetogram konstrueres da dette ligger til grunn for flomestimering ved nedbør-avløpmodeller. Det konstrueres hyetogram basert på data avlest fra IVF-kurve og med utgangspunkt i observert ekstremnedbør, ved 2 og 5 års gjentaksintervall. Gjentaksintervall er valgt med utgangspunkt i tabell 2, hvorav observerte hendelser markert med grått er evaluert.

### **5.5.1 Design hyetogram basert på IVF-kurve**

Konsentrasjonstiden for Svarttjønnbekken er funnet å være 126,6 minutter. Beregningssteg på 5 minutter er benyttet da Lindholm et al. (2003) har funnet dette hensiktsmessig. For bedre muligheter til sammenligning konstrueres også regnhyetogram med beregningssteg på 30 minutter, da observert data har tidssteg på 30 minutter. Endelig hyetogram er gitt i vedlegg 13.

Nedbørvolum ved Voll basert på hyetogram ved 2- og 5-års gjentaksintervall er henholdsvis 15,9 og 20,9 mm. Dette samsvarer med nedbørvolum avlest IVF-kurve ved 5 års gjentaksintervall, gitt til 21,2 mm. Observert nedbørvolum for utvalgte flomhendelser er funnet å være betydelig lavere. Tabell 9 og tabell 10 presenterer observert nedbørvolum med varighet tilnærmet lik konsentrasjonstiden, samt nødvendig varighet for å oppnå nedbørvolum tilsvarende hyetogram fra Voll.

Tabell 9: Nedbørvolum for flomhendelser med tidssteg 30 minutter og gjentakintervall 2 år.

Flomhendelse	Nedbørvolum ved 120 min varighet [mm]	Nødvendig varighet for å oppnå nedbørvolum lik hyetogram [min]
September 1997	7,24	270
April 1998	6,02	330
Juli 1999	6,42	330

Tabell 10: Nedbørvolum for flomhendelser med tidssteg 3 timer og gjentakintervall 5 år.

Flomhendelse	Nedbørvolum ved 180 min varighet [mm]	Nødvendig varighet for å oppnå nedbørvolum lik hyetogram [min]
September 1984	7,8	720
Desember 1987	11,6	630
Mars/april 1990	22,1	-

Fra resultatene i tabell 9 og tabell 10 kan det konkluderes med at det kreves betydelig lenger varighet enn konsentrasjonstiden for å oppnå nedbørvolum tilsvarende hyetogram. Konsentrasjonstiden er bestemt ved empiriske formler, og kan evalueres ved å se på lengste vannveg fra ytterst i nedbørfeltet til målestasjon sammen med gjennomsnittlig vannhastighet. Lengste vannveg bestemmes ved kartverk i målestokk til å være omtrent 4200 m. Hastigheten er antatt å være 1 m/s. Med utgangspunkt i dette beregnes konsentrasjonstiden til å være 70 minutter. Ved kontroll oppnås altså kortere varighet enn konsentrasjonstiden beregnet ved formel (4). De korte varighetene kan komme av at metodene for beregning av konsentrasjonstid ikke tar hensyn til feltets store dempingseffekt. Kontrollberegningene tar kun hensyn til feltets lengde, mens effektiv sjøprosent er tatt i betraktning ved bruk av empiriske formler. Feltet for Svartjønnbekken består av store skog- og myrarealer som kan ha betydelig innvirkning på feltets responstid. På bakgrunn av dette kan beregninger basert på konsentrasjonstid gi unøyaktige resultater.



### 5.5.2 Design hyetogram basert på ekstremnedbør

Hyetogram konstrueres også basert på ekstremnedbør, med utgangspunkt i maksimale døgnverdier for Svarttjønnbekken ved 2- og 5-års gjentaksintervall. Gjentaksintervall for maksimale døgnverdier bestemmes ved frekvensanalyse. Hendelser med 2-års gjentaksintervall er basert på data med 30-minutters tidsintervall, mens hendelser med 5-års gjentaksintervall er basert på 3-timerdata. Frekvensanalyse gjennomføres med utgangspunkt i R-script gitt i vedlegg 8, og gir maksimal døgnverdi for 2- og 5-års gjentaksintervall lik henholdsvis 36,5 mm og 44,7 mm.

Resultater fra analyser utført av Meteorologisk Institutt i NIFS-prosjektet gir et godt grunnlag for å velge dimensjonerende nedbør for varigheter opp mot 24 timer. På bakgrunn av dette konstrueres hyetogram ved varighet på et døgn. Prosentandeler av nedbør med varighet < 24 timer bestemmes med utgangspunkt i figur 4. Endelig hyetogram er presentert i vedlegg 14.

Tabell 11 og tabell 12 presenterer nedbørvolum ved 24 timer varighet for utvalgte observerte flomhendelser med henholdsvis 2- og 5-års gjentaksintervall. Prosentvis avvik fra nedbørvolum gitt ved frekvensanalyse er også bestemt, til sammenligning.

*Tabell 11: Nedbørvolum for flomhendelser med tilnærmet 2-års gjentaksintervall.*

<b>Flomhendelse</b>	<b>Nedbørvolum, 24 timer varighet [mm]</b>	<b>% - avvik fra nedbørvolum ved flomfrekvensanalyse</b>
September 1997	54,5	49,3
April 1998	18,35*	-49,7
Juli 1999	57,3	57,0

\* Kan skyldes snøsmelting da det er økende temperatur ved hendelsen

*Tabell 12: Nedbørvolum for flomhendelser med tilnærmet 5-års gjentaksintervall.*

<b>Flomhendelse</b>	<b>Nedbørvolum, 24 timer varighet [mm]</b>	<b>% - avvik fra nedbørvolum ved flomfrekvensanalyse</b>
September 1984	40,6	-9,2
Desember 1987	48,8	9,2
Mars/april 1990	96,7*	116,3

\* Kan skyldes snøakkumulering da temperaturen er rundt 0 °C

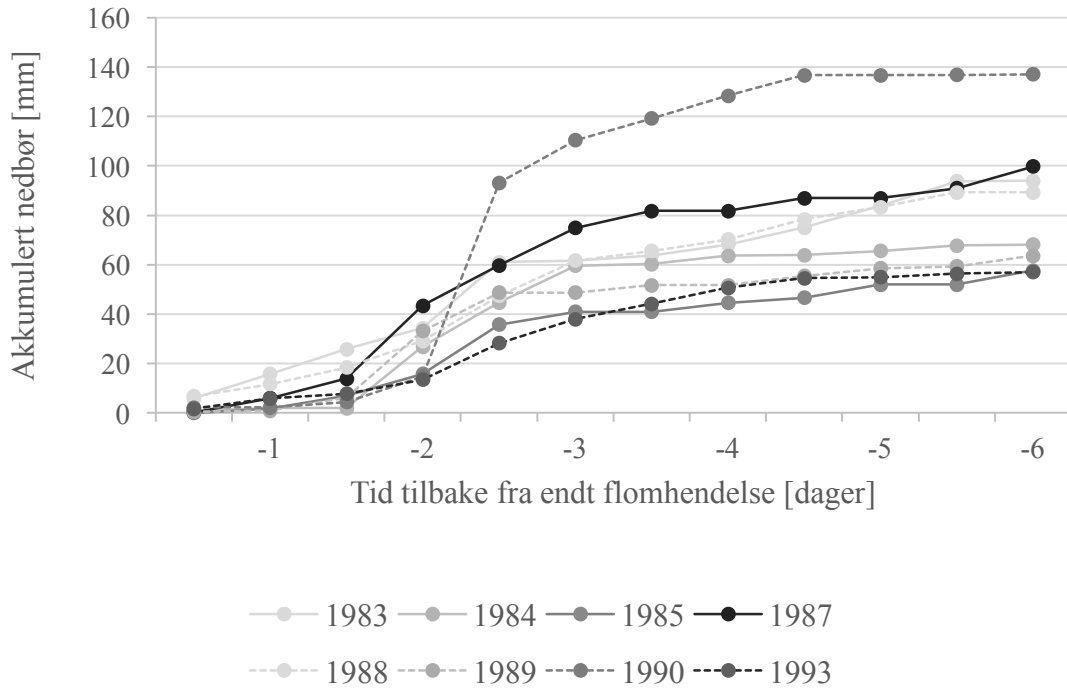
Fra tabellene er det gitt at nedbørvolum stemmer godt overens ved 5-års gjentaksintervall, med unntak av hendelsen i mars/april 1990, hvor deler av nedbøren trolig kommer i form av snø. For 2-års gjentaksintervall er observert nedbørvolum betydelig høyere enn volumet bestemt ved flomfrekvensanalyse, med unntak av hendelsen i april 1998, hvor det trolig er snøsmelting som genererer flom.

Variierende samsvar for hendelser med 2- og 5-års gjentaksintervall, basert på data med henholdsvis 30-minutter og 3-timers tidsintervall, kan skyldes varierende lengde på dataseriene. Dataserie med 30-minutters tidsintervall er betydelig kortere enn serien med 3-timerdata. Dette kan utgjøre en stor feilkilde ved frekvensanalyse, da enkelte ekstremnedbørhendelser kan påvirke resultatet betraktelig.

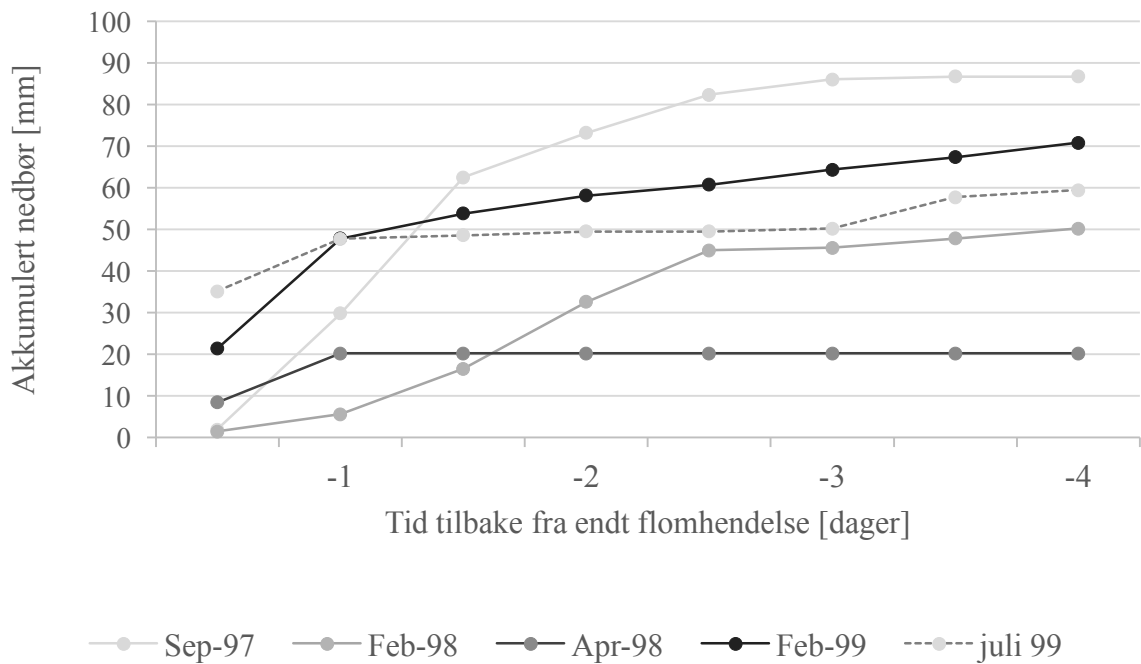
### **5.5.3 Sammenligning av design hyetogram**

Design hyetogram basert på lokal ekstremnedbør er funnet å representere observerte nedbørhendelser bedre enn hyetogram basert på IVF-kurve. En årsak kan være at store flomhendelser typisk er generert av nedbør med lengre varighet. Videre kan det også skyldes lokale variasjoner i nedbør, da det er tatt utgangspunkt i IVF-kurve ved Voll, omtrent 18 km fra Svarttjønnbekken.

Nedbørvolum tilsvarende hyetogram basert på IVF-kurve oppnås sjelden for observert nedbør ved lik varighet. Det ser ut til at observert nedbør krever varighet lenger enn konsentrasjonstiden for å oppnå nedbørvolum som samsvarer med hyetogram. En trend for observerte nedbørhendelser som genererer flom er at intensiteten ikke nødvendigvis er høy, men at nedbørhendelsen heller har lengre varighet. Dette bekreftes av figur 12 og figur 13, som viser en jevn akkumulering av nedbør flere dager tilbake fra endt flomhendelse.



Figur 12: Akkumulert nedbør tilbake fra flomtopp for 3-timersdata.



Figur 13: Akkumulert nedbør tilbake fra flomtopp for 30-minuttersdata.

## 5.6 PQRUT

En vurdering av PQRUT gjøres ved at utvalgt flomhendelse ved Svarttjønnbekken kalibreres, og parameterne  $K_1$ ,  $K_2$ , terskel  $T$  og initialtilstand  $H$  fastsettes. Utvalgt flomhendelse for kalibrering velges med utgangspunkt i best samsvar mellom observert nedbørvolum og totalt nedbørvolum fra design hyetogram. Samsvar bestemmes fra tabell 9 og tabell 10 for hyetogram basert på IVF-kurve, mens tabell 11 og tabell 12 benyttes for å bestemme hvordan observert nedbør og hyetogram basert på ekstremnedbør samsvarer. Videre kontrolleres temperatur ved flomhendelsene for å unngå å kalibrere mot en hendelse hvor snøsmelting/snøakkumulering er aktuelt. På bakgrunn av dette velges hendelsen fra september 1997 for 2-års gjentaksintervall og september 1984 for 5-års gjentaksintervall til kalibrering for begge hyetogram. Hendelsene fra 1987 og 1990 er funnet å ha volum som samsvarer bedre med hyetogram basert på IVF-kurve, men det ser ut til at noe av nedbøren kommer i form av snø. Snøsmelting er aktuelt ved hendelsen i april 1998. På bakgrunn av dette er hendelsene fra 1987, 1990 og 1998 utelukket.

Flomhendelsen fra september 1997 er presentert grafisk i figur 7, hvor det kommer fram at hendelsen består av to flomtopper. For å oppnå mest nøyaktig kalibrering og best samsvar med hyetogram deles hendelsen slik at det kalibreres for kun én flomtopp. Dette resulterer i observert nedbørvolum lik 21,4 mm ved varighet lik 18 timer. For hendelsen fra september 1984 er nedbørvolum funnet å være 56,0 mm, hvorav volum er bestemt ved varighet i underkant av 3 døgn.

For sammenligning beregnes også parameterne ved formel (7), (8) og (9) i tillegg til at  $K_2$  bestemmes med utgangspunkt i konsentrasjonstid. Parameter-verdier er presentert under i tabell 13. Hydrogram som viser observert vannføring ( $Q_{\text{obs}}$ ) mot beregnet vannføring med utgangspunkt i kalibrerte parametere ( $Q_{\text{sum}}$ ) er gitt i vedlegg 15.

Tabell 13: Parameter-verdier ved PQRUT.

Metode for bestemmelse av parameter-verdier	K1	K2	T	H
Formelverk	0,067	0,019	0,899	5
Kalibrering, september 1997	0,018	0,067	1	1
Kalibrering, september 1984	0,070	0,001	1	1
Kalibrering med K2 basert på $T_c$ , september 1997	0,019	0,008*	2	4
Kalibrering med K2 basert på $T_c$ , september 1984	0,068	0,008*	1	1

\*  $K2 = 1/T_c$ , resterende parametere kalibreres med utgangspunkt i utvalgte flomhendelser.

Ved kalibrering er det tatt utgangspunkt i at det er full metning ved initialtilstand, altså er initialtilstand alltid satt til en høyere verdi enn terskelverdien. Korrigering av verdier bestemt ved formelverk er ikke nødvendig da nedbørfeltet for Svarttjønnbekken har mindre enn 10 % effektiv sjø og mindre enn 20 % myr (Andersen et al., 1983). Vannføring ved 2- og 5-års gjentaksintervall bestemmes videre ved å benytte parameter-verdier fra tabell 13 som input til hyetogram. Vannføring er estimert med utgangspunkt i hyetogram basert på IVF-kurve ved Voll og ekstremnedbør ved Svarttjønnbekken, gitt i henholdsvis vedlegg 13 og vedlegg 14. Resultater er presentert i tabell 14.

Tabell 14: Vannføring for Svarttjønnbekken basert på PQRUT.

	Metode for bestemmelse av parameter-verdier	Vannføring [m <sup>3</sup> /s]	
		Q <sub>2</sub>	Q <sub>5</sub>
<i>Gumbelfordeling (GUM)</i>	Flomfrekvensanalyse, 30-min data	1,53	2,28
<i>Generalisert ekstremverdi fordeling (GEV)</i>	Flomfrekvensanalyse, 3-timers data	1,61	2,13
<i>Hyetogram basert på konsentrasjonstid, T<sub>c</sub></i>	Formelverk	0,57	0,68
	Kalibrering, september 1997	0,20	
	Kalibrering, september 1984		0,61
	Kalibrering, K2 basert på T <sub>c</sub>	0,26	0,60
<i>Hyetogram basert på ekstremnedbør</i>	Formelverk	1,18	1,43
	Kalibrering, september 1997	0,43	
	Kalibrering, september 1984		1,38
	Kalibrering, K2 basert på T <sub>c</sub>	0,44	1,36

Ved sammenligning med resultat fra flomfrekvensanalyse er estimert vannføring med utgangspunkt i hyetogram basert på ekstremnedbør funnet å samsvare best. Videre kan det konkluderes med at parametere beregnet ved formelverk gir vannføring som samsvarer bedre med resultat fra flomfrekvensanalyse, sammenlignet med parametere bestemt ved kalibrering. En generell trend er at vannføring ved PQRUT er lavere enn ved flomfrekvensanalyse, altså underestimeres vannføring i Svarttjønnbekken ved bruk av metoden.

## **5.7 Oppsummering og diskusjon**

Vurdering av hydrologiske dimensjoneringsmetoder er gjennomført ved sammenligning av beregningsresultater og observert data for Svarttjønnbekken. Lokale nedbørvariasjoner og samsvar mellom design nedbør og observert nedbør er også evaluert. Sammenligninger gjøres med utgangspunkt i resultat fra flomfrekvensanalyse for bestemmelse av gjentaksintervall for observert data. Dokumenterte feilkilder ved metodene vurderes opp mot resultater fra denne studien.

### **5.7.1 Flomfrekvensanalyse**

Resultater fra frekvensanalyse brukes som utgangspunkt ved videre evaluering av metoder og nedbørdata, dette til tross for store usikkerheter knyttet til resultatene. Usikkerheten skyldes delvis omregning fra vannstand til vannføring. Omregningen bygger normalt på vannføringskurver som er ekstrapolert til et område langt utenfor området med vannføringsmålinger. Et tiltak kan være å 3D-modellere vannstand-vannføringskurver for ekstremflom, noe som vil redusere usikkerhet i ekstremflomestimer (Basberg, 2016).

Usikkerhet ved frekvensanalyse kan også skyldes at dataseriene ikke har tilstrekkelig lengde. Enkelte dataserier ved Svarttjønnbekken er så korte at én storflom kan påvirke resultatene betraktelig, dette gjelder spesielt nedbørdata. Når en storflom inkluderes i flomanalyser vil gjentaksintervallet for en gitt flomstørrelse bli betraktelig redusert sammenlignet med andre analyser hvor storflommen ikke er inkludert. Storflommen vil ha større innvirkning desto kortere dataserien er. Grunnet tidsbegrensning er frekvensanalyse gjennomført med utgangspunkt i flom- og nedbørdata ved Svarttjønnbekken til tross for at enkelte dataserier ikke er tilstrekkelig lange. Gjentaksintervall for vannføring og nedbør er gitt i tabell 15, for sammenligning.

Tabell 15: Gjentakintervall for vannføring og nedbør ved flomfrekvensanalyse.

	Dato	Gjentaksintervall, vannføring	Gjentaksintervall, nedbør
<i>3-timers tidsintervall</i>	<b>Oktober 1983</b>	10,8	1,2
	<b>September 1984</b>	4,5	1,0
	<b>Oktober 1985</b>	1,8	1,3
	<b>Desember 1987</b>	6,2	1,2
	<b>November 1988</b>	2,7	1,0
	<b>Juli/August 1989</b>	2,5	1,1
	<b>Mars/April 1990</b>	4,8	5,1
	<b>Oktober 1993</b>	1,8	1,0
<i>30-minutters tidsintervall</i>	<b>September 1997</b>	2,4	1,2
	<b>Februar 1998</b>	3,7	1,0
	<b>April 1998</b>	2,1	1,0
	<b>Februar 1999</b>	4,2	1,3
	<b>Juli 1999</b>	2,5	1,4

Fra tabell 15 er det gitt at gjentakintervall ved Svarttjønnbekken er relativt korte, og at det er lite samsvar mellom gjentakintervall for nedbør og vannføring. De korte gjentakintervallene for nedbør kan skyldes at dataseriene ikke er tilstrekkelig lange, hvorav ekstremnedbørhendelser påvirker frekvensfordelingen i stor grad og reduserer gjentakintervallet. Gjentakintervall for vannføring ved Svarttjønnbekken er også funnet å være relativt korte til tross for at dataseriene har tilstrekkelig lengde. På bakgrunn av de korte gjentakintervallene kan de kortere dataseriene anses som mer tilstrekkelig.

Resultatene i tabell 15 tilsier videre at ekstrem flom ikke nødvendigvis genereres av ekstremnedbør. På bakgrunn av dette kan det også vurderes hvorvidt ekstremnedbør vil generere ekstremflom. Maksimale årsverdier for nedbør er gitt i vedlegg 7. Vannføring ved de tre største nedbørverdiene for 30-minuttersdata og 3-timersdata er vurdert, hvorav ingen er funnet å generere ekstreme flomhendelser. Dette samsvarer med resultater fra en studie gjennomført av Hailegeorgis og Alfredsen (2016). Studien tar for seg en serie årsmaksimale nedbørverdier, hvorav under halvparten er funnet å generere ekstremflom.



Grafiske presentasjoner av utvalgte flomhendelser ved Svarttjønnbekken er presentert i vedlegg 3 og vedlegg 4. Fra figurene er det gitt at flertallet av hendelsene genereres av mer langvarig nedbør med lavere intensitet. Figur 12 og figur 13 viser akkumulert nedbør 7 dager tilbake fra endt flomhendelse, og bekrefter at nedbør akkumuleres jevnt over flere dager for flertallet av flomhendelsene.

Resultater fra tabell 15 gir at gjentaksintervall for nedbør og avrenning samsvarer best ved flomhendelsene fra oktober 1985 og mars/april 1990. Fra grafiske framstillinger av flomhendelsene og figurer for akkumulert nedbør er det gitt at hendelsene kommer som følge av mer ekstreme nedbørhendelser. Dette kan bekreftes ved å se på maks nedbørvolum i tabell 3, hvor hendelsene er de med høyest nedbørvolum.

Snøsmelting/snøakkumulering og geografiske forhold for nedbørfeltet vil også påvirke sammenhengen mellom nedbør og etterfølgende flom i stor grad. Maksimale verdier for årsnedbør benyttes som input ved frekvensanalyse av nedbør. Enkelte verdier er funnet å være hentet fra vintermånedene. Dette kan være en stor feilkilde da nedbøren kan komme i form av snø, og dermed ikke generere flom direkte. Sesongfordeling av input-verdier er derfor anbefalt ved frekvensanalyse av nedbør.

### **5.7.2 Formelverk for små nedbørfelt**

Stenius et al. (2015b) konkluderer med at usikkerheten i beregninger ved formelverk for små nedbørfelt øker med økende returperiode. Resultatene fra beregninger ved Svarttjønnbekken, gitt i tabell 4, kan ikke bekrefte dette da prosentvis avvik varierer uavhengig av gjentaksintervall. En årsak til dette kan være at ingen av flomhendelsene har tilstrekkelig høyt gjentaksintervall til at usikkerheten kommer fram.

Av de tre parameterne som inngår i formelverket (areal, normalavrenning og effektiv sjøprosent) er det videre knyttet størst usikkerhet til normalavrenningen. Verdien hentes typisk fra et avrenningskart, som er funnet å være bedre i noen områder enn andre (Stenius et al., 2015b). En forbedret vurdering av denne størrelsen kan bedre estimatet av flomverdien ved formelverket.

### 5.7.3 Usikkerhet i nedbørdata

Lokale nedbørvariasjoner er en aktuell feilkilde ved bruk av den rasjonale metode og PQRUT, da IVF-kurve er hentet fra Voll. På bakgrunn av dette er det gjort sammenligninger mellom nedbørmålinger ved Svarttjønnbekken og i Trondheimsområdet, gitt i tabell 5 og tabell 6. Nedbør ved Svarttjønnbekken med 30-minutters tidsintervall er sammenlignet med nedbør fra målestasjonen ved Voll for alle hendelser. Nedbørdata ved Voll er ikke tilgjengelig i tidsrommet hvor 3-timersdata er hentet fra, det sammenlignes derfor med andre nedbørstasjoner i Trondheimsområdet. Utvalgte stasjoner er hovedsakelig Nidarvoll og Øvre Leirfoss, samt Leinstrand for én flomhendelse. Største avvik er funnet mellom Voll og Svarttjønnbekken, hvor det er rundt 40 % for alle flomhendelser.

Videre ser det ut til at størrelsen på avvik varierer avhengig av hvilken nedbørstasjon i Trondheim det sammenlignes med. Dette indikerer at det er store lokale variasjoner også innad i Trondheimsområdet. Avvik mellom stasjonene ved Voll og Risvollan er vurdert i en studie gjennomført av Pollmeier (2014). Studien konkluderer med at avvikene mellom stasjonene kan være opp mot 40 % (T. Muthanna, pers. medd. 02.05.2017)

### 5.7.4 Den rasjonale metode

Den rasjonale metode er funnet å gi en betydelig overestimert vannføring sammenlignet med resultatene fra flomfrekvensanalyse for Svarttjønnbekken. En årsak til dette kan være at metoden er anbefalt for svært små nedbørfelt med liten demping. Nedbørfeltet for Svarttjønnbekken har et areal på 3,5 km<sup>2</sup> og kan dermed anses som for stort for beregninger ved metoden. I tillegg har feltet stor dempingeffekt som følge av store andeler skog, myr og overflatevann. Det er videre funnet å være stor usikkerhet i beregnet konsentrasjonstid for feltet. Lenger varighet vil resultere i lavere estimert vannføring, altså vil dette redusere overestimatet ved metoden.

Den største usikkerheten ved bruk av den rasjonale metode ligger i valg av avrenningskoeffisienten. På bakgrunn av dette er C-verdien for de utvalgte flomhendelsene ved Svarttjønnbekken beregnet basert på observerte flomverdier. Resultatene viser at antatt C-verdi er betydelig høyere enn beregnet, da antatt verdi er 0,35, mens gjennomsnittlig beregnet C-verdi er funnet å være 0,22. Linsley (1986) konkluderer med at det ofte antas overdrevet høye andeler ugjennomtrengelige flater innad i nedbørfelt ved bruk av den rasjonale metode, altså at det velges for høy avrenningskoeffisient. Effektivt ugjennomtrengelig areal er funnet å sjelden

overgå 30 %, dette vil kun skje i urbane områder med meget høy tetthet av boliger uten åpne områder rundt.

Beregnete C-verdier viser liten variasjon i verdien for de ulike hendelsene, noe som tilsier at graden av avrenning varierer lite for feltet. Dette kan skyldes den gode dempingseffekten i nedbørfeltet.

### 5.7.5 Usikkerheter i design hyetogram

Ved nedbør-avløpsmodeller bestemmes flom med utgangspunkt i et konstruert design hyetogram basert på IVF-kurve eller alternativt basert på ekstremnedbør. Tabell 16 presenterer nedbørvolum for begge hyetogram, ved ulik varighet.

*Tabell 16: Nedbørvolum for hyetogram basert på IVF-kurve og ekstremnedbør.*

<b>Nedbørvolum [mm] for hyetogram</b>	<b>2 år gjentaksintervall</b>	<b>5 år gjentaksintervall</b>
Basert på IVF-kurve (varighet 126 min)	15,12	21,60
Basert på ekstremnedbør (varighet 24 timer)	36,50	44,70

Fra tabellen er det gitt at hyetogram basert på ekstremnedbør har omtrent dobbelt nedbørvolum samtidig som varigheten er 22 timer lenger, sammenlignet med hyetogram basert på IVF-kurve. Det kan dermed konkluderes med at hyetogram basert på IVF-kurve har betydelig høyere regnintensitet. Fra observerte flomhendelser er det gitt at nedbør som genererer flomtopper ofte har lengre varighet og ikke nødvendigvis høy regnintensitet. Fra 13 utvalgte flomhendelser genereres kun 2 av disse som følge av kortvarig nedbør med høy intensitet. På bakgrunn av dette kan det konkluderes med at hyetogram basert på observert ekstremnedbør gir en bedre beskrivelse av forholdene for flertallet av flomhendelsene.

Regnhyetogram er funnet å representere nedbørforløp i varierende grad da metoden tar utgangspunkt i at flom genereres ved kortvarige ekstremnedbørhendelser. Usikkerheten kommer hovedsakelig av at varighet på nedbør som genererer flom varierer betydelig. I tillegg vil noe av nedbøren komme i form av snø eller infiltreres til bakken, samtidig som flom også kan genereres av smeltevann. Langsiktige simulerte nedbørmodeller kan benyttes framfor design hyetogram for å minimere usikkerhet. Slike simuleringsmodeller er mer aktuelle i

dagens samfunn som følge av økt datakapasitet og bedre metoder for å generere nedbørdata som input til simuleringene. Et eksempel er SCHADEx metode, hvor en lang serie med mulige regnintensiteter og faktorer for nedbørfelt genereres og avrenning for XX-returperiode produseres.

### **5.7.6 PQRUT**

PQRUT er funnet å underestimere vannføring ved Svarttjønnbekken, både ved kalibrering og bruk av formelverk for å bestemme parameterne K1, K2 og T. Metoden er anbefalt benyttet for nedbørfelt opp til 50 km<sup>2</sup>, hvorav Svarttjønnbekken kan anses som et mindre felt med et areal på 3,5 km<sup>2</sup>. Dette kan være årsak til underestimeringen da Stenius og Glad (2015) har funnet at modellen har en tendens til å underestimere flomverdier ved mindre felt og overestimere for de større nedbørfeltene. Ved små felt kan dette skyldes at feltet responderer raskere enn modellen. Et alternativ kan være å innføre flere parametere, som til gjengjeld vil avansere bruken av metoden. Gjennomgående underestimering ved metoden bør kontrolleres ved flere små nedbørfelt for å vurdere om metodens anbefalte bruksområde bør justeres.

En annen årsak til underestimering av flom ved PQRUT kan være usikkerhet ved fastsetting av initialverdier, som i høy grad baseres på subjektive vurderinger (Lundquist, 2016).

## **5.8 Konklusjon**

Antagelser om at nedbør med bestemt returperiode genererer flom med tilsvarende returperiode er grunnleggende ved flere hydrologiske dimensjoneringsmetoder. Fra resultater i tabell 15 og videre diskusjon kan det konkluderes med at det er lite samsvar mellom gjentakintervall for nedbør og vannføring ved utvalgte flomhendelser. En mulig årsak er at nedbør kan opptre i form av snø, det kan være snøsmelting i området eller nedbøren kan infiltreres ved uttørket felt. Videre kan det også skyldes at flertallet av ekstreme flomhendelser genereres av langvarig nedbørhendelser med lavere intensitet. Fra observasjonsdata er det også gitt at ekstremverdier for nedbør ikke nødvendigvis genererer ekstreme flomhendelser. På bakgrunn av dette kan det konkluderes med at forhold i nedbørfeltet har stor innvirkning på hvor stor andel av nedbøren som genererer flom.

Ved å benytte langsiktige simulerte nedbørmodeller framfor regnhyetogram kan usikkerhet minimeres. Et eksempel er SCHADEx metode. Metoden er fordelaktig ved at det genereres en

lang serie med mulige regnintensiteter og faktorer for nedbørfelt og produseres avrenning for XX-returperiode. Altså er det ikke lagt til grunn at nedbør med gitt gjentaksintervall gir flom med korresponderende gjentaksintervall. Genererte langsiktige tidsserier kan analyseres ved flomfrekvensanalyse, som gir mulighet for sammenligning og videre et mer nøyaktig resultat.

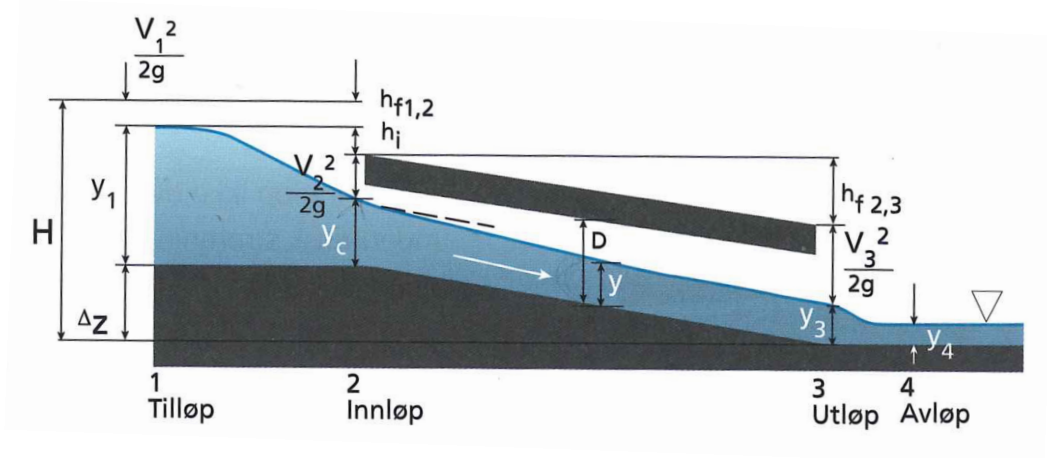
Ved sammenligning av vannføring bestemt ved hydrologiske dimensjoneringsmetoder og observerte flomhendelser er det funnet at formelverk for små nedbørfelt gir resultater som samsvarer best med observerte verdier. Nedbørfeltet for Svarttjønnbekken er noe større enn anbefalt ved den rasjonale metode, noe som kan være en årsak til den betydelige overestimeringen ved bruk av metoden. Videre gir PQRUT et betydelig underestimat av vannføring. Dette kan skyldes at nedbørfeltet ved Svarttjønnbekken ikke er tilstrekkelig stort, slik at responstiden i feltet er raskere enn modellens kapasitet.

Det er funnet å være store lokale variasjoner i nedbør, hvorav prosentvis avvik for Svarttjønnbekken og Voll er rundt 40 %. På bakgrunn av dette kan det konkluderes med at det er behov for flere målestasjoner. Flere målinger med kortere tidsintervall er også nødvendig da disse vil ta med flomtopper i større grad.



## 6 STIKKRENNEKAPASITET

Hydrologisk dimensjonering omfatter typisk kapasitetsberegninger av stikkrenner, som ofte baseres på flomverdier bestemt ved hydrologiske dimensjoneringsmetoder. Stikkrennekapasitet kan bestemmes av forholdene ved innløpet (innløpskontroll) eller av forholdene i kulverten eller stikkrenna som helhet (utløpskontroll). Stikkrenner er korte kulverter med større fall og typisk innløpskontroll (NVE, 2010). Figur 14 definerer de viktigste størrelsene ved kulvertstrømning.



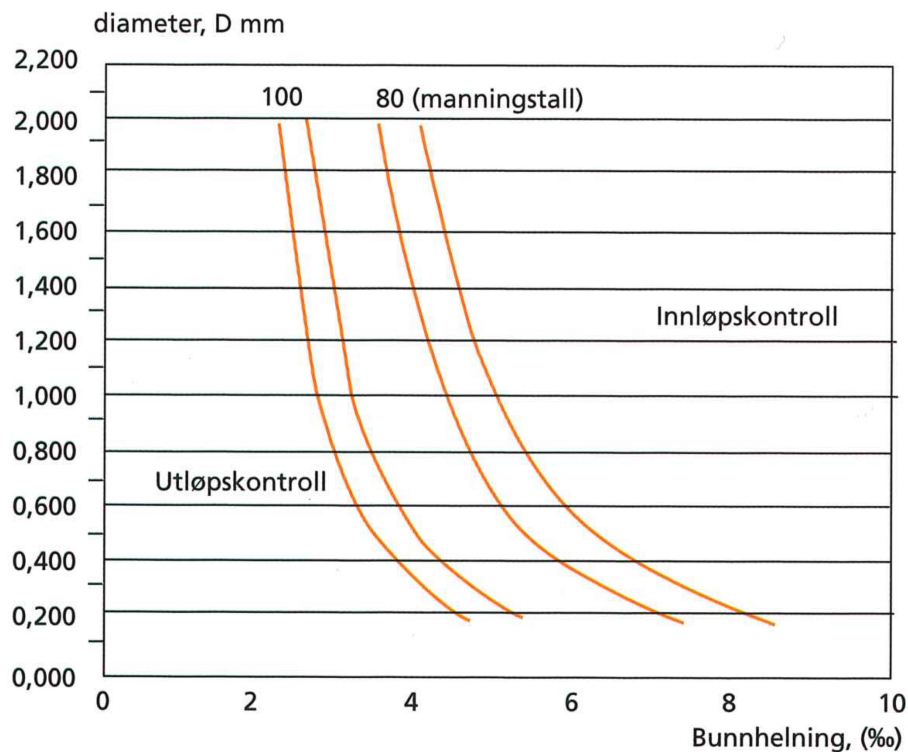
Figur 14: Definisjoner for beskrivelse av strømningsforhold i en kulvert (NVE, 2010).

Teknisk regelverk for Bane NOR krever minimumhelning for stikkrenner lik 4 ‰ for å oppnå selvreising. Regelverket tilsier også at helning ikke må overskride 10 ‰ i tilfeller hvor erosjonsproblemer antas å kunne oppstå ved utløp som følge av stor vannhastighet (Bane NOR, 2015). Stikkrenner som benyttes ved jernbanen i dag skal ha minimum indre diameter lik 600 mm og kan bestå av plast, betong eller stål.

I håndbok N200 for vegbygging anbefaler Statens Vegvesen (2014) at rette stikkrenner med lengde mindre enn 15-20 m bør dimensjoneres slik at man får strømningssituasjon med innløpskontroll og frispelstrømning. Det ønskes frispelstrømning i innløpet for å unngå opphoping av drivende gjenstander i tilløpet. Dette innebærer videre at det er en viss reservekapasitet som kan utnyttes dersom dimensjonerende vannføring blir overskredet (NVE, 2010). Reservekapasitet og vannstandsheving bør beregnes for å vurdere konsekvenser.

## 6.1 Teori

Stikkrennekapasitet beregnes ulikt avhengig av om det er innløpskontroll eller utløpskontroll. Det er typisk innløpskontroll ved kortere stikkrenner med større fall, og utløpskontroll ved lengre stikkrenner/kulverter med mindre helning (NVE, 2010). Figur 15 kan benyttes til å bestemme strømningstype for kulverter avhengig av bunnhelning og dimensjon.



Figur 15: Minimumsfall for innløpskontroll, plastrør t.v. og betongrør t.h. (NVE, 2010).

Stikkrennekapasitet bestemmes av tverrsnittareal, innløpets geometri og vannstand ved innløpet. Ved utløpskontroll er også friksjonsforhold, helning og lengde av stikkrenne, samt vannstand ved utløp avgjørende for kapasiteten. Geometrien av innløpet kan ha betydelig effekt på innløpstapet. Friksjonstap har normalt liten innvirkning på kapasiteten, men kan ha betydning ved lange kulverter av materialer med stor ruhet eller ved liten helning. Stikkrennekapasitetsberegninger er typisk utført ved å kombinere kontinuitetsligningen og energiligningen mellom et snitt i stikkrenna og et nedstrøms. Plassering av snittet nedstrøms avhenger av strømningstype gjennom stikkrenna (French, 1994).



### 6.1.1 Innløpskontroll

Ved innløpskontroll og fritt vannspeil er kulvertens kapasitet entydig bestemt av vannstanden ved innløp  $y_1$ , tverrsnittareal  $A$  og innløpets geometri. Dette er tilfellet inntil relativ vannstand i tilløpet til kulverten tilsvarer  $y_1/D \sim 1,2$ . Ved  $y_1/D < 1,2$  går strømminga ”gjennom kritisk” i innløpet, hvor Froudetallet er lik 1. Froudes tall brukes til å vurdere overgangen mellom underkritisk ( $Fr < 1$ ) og overkritisk ( $Fr > 1$ ) strømming, og er definert ved formel (11) (NVE, 2010). Vanddybde bestemmes med utgangspunkt i energiligningen gitt ved formel (12).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y_c}} \quad (11)$$

$$y_1 = y_c + \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

Hvor

$y_1$  = Vanddybde ved innløp [m]

$y_c$  = Kritisk dybde [m]

$v$  = Vannhastighet [m/s]

$Fr$  = Froudetall [-]

Ved innløpskontroll bestemmes dermed hastigheten i kulverten ved kritisk strømming, hvor  $Fr = 1$ . Fra formel (11) gir dette  $v = \sqrt{g \cdot y_c}$ . Ved å sette dette inn for hastighet i formel (12) kan kritisk dybde bestemmes ved  $y_c = \frac{3}{2}y_1$ . Kontinuitetsligninga, gitt i formel (13), benyttes videre for å bestemme vannføring.

$$Q = v \cdot A \quad (13)$$

Ved økende vannstand vil energilinjen nå topp av kulvert, og innløpet vil videre bli dykket ved  $y_1/D > 1,2$ . Ved dykket innløp og innløpskontroll skilles det mellom hydraulisk kort og lang kulvert, som refererer til henholdsvis delvis full eller full kulvert. Betingelser for overgang mellom de to strømmingstypene er presentert av NVE (2010) i Vassdragshåndboka, og gitt i vedlegg 16 sammen med tabell for bestemmelse av vannføringskoeffisient,  $C_D$ . For hydraulisk korte kulverter vil innløpet fungere som et dykket utløp fra et basseng med vannføring gitt ved formel (14).

$$Q = C_D A \sqrt{2gy_1} \quad (14)$$

Hvor

$C_D$  = Vannføringskoeffisient, bestemmes fra tabell [-]

Ved store vannmengder kan det skje overløp over veg/jernbane, dette beregnes for å vurdere eventuelle konsekvenser. Overløp er aktuelt når vannstand ved innløp er større enn høyde på rennen samt overfylling. Vannføring over kulverten kan beregnes ved formel (15).

$$Q = C \cdot L_{eff} \cdot H_0^{3/2} \quad (15)$$

Hvor

$C$  = Overløpskoeffisient [ $m^{1/2}/s$ ]

$L_{eff}$  = Effektiv lengde [m]

$H_0$  = Dimensjonerende overløpshøyde [m]

### 6.1.2 Utløpskontroll

En kulvert vil være utløpskontrollert ved underkritisk strømning eller ved dykket inn- og utløp, som typisk skjer ved lav helning og stor lengde. Når innløpet ikke er dykket og strømningen er underkritisk kan det antas kritisk dybde ved utløp,  $y_c = \frac{3}{2}y_1$ . Kapasiteten beregnes ved Mannings, gitt i formel (16).

$$Q = M \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (16)$$

Hvor

$M$  = Manningstall [ $m^{1/3}/s$ ]

$A$  = Vått tverrsnittareal [m<sup>2</sup>]

$R$  = Hydraulisk radius [m]

$I$  = Helning [-]

Utløpskontroll vil også typisk oppstå ved dykket inn- og utløp, hvor kapasiteten bestemmes med utgangspunkt i Bernoullis ligning. Vannstand ved utløpet,  $y_2$ , er gitt med utgangspunkt i energiligninga, altså vannstand ved innløp minus innløpstap ( $h_{L,1}$ ), utløpstap ( $h_{L,2}$ ) og friksjonstap ( $h_F$ ) gjennom renna. Vannstand bestemmes ved formel (17), mens en omforming av Bernoulli, gitt i formel (18), bestemmer kapasiteten.

$$y_2 = y_1 - h_{L,1} - h_{L,2} - h_F - I \cdot L \quad (17)$$

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2gH}{K_i + f \frac{L}{D} + K_u}} \quad (18)$$

Hvor

- f = Friksjonskoeffisient, bestemmes ved Moodys diagram
- H = Høydeforskjell ved inn- og utløp, samlet energitap [m]
- K<sub>i</sub> = Innløpskoeffisient, bestemmes ved tabell [-]
- K<sub>u</sub> = Utløpskoeffisient [-]

## 6.2 Kapasitetsberegninger

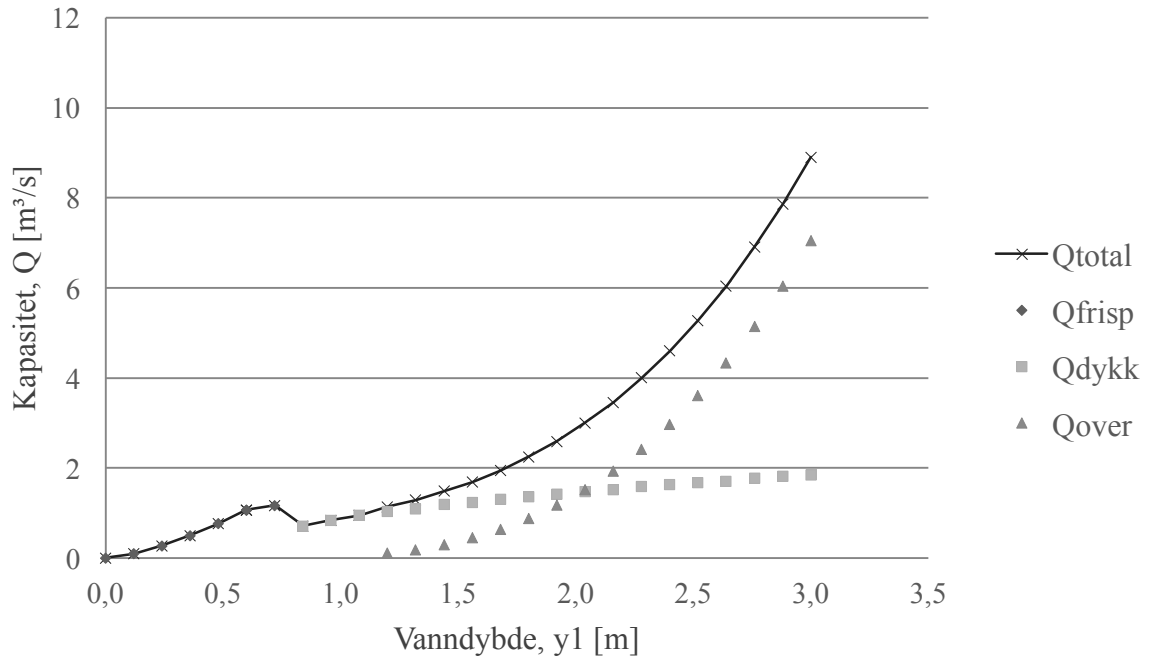
Beregninger er gjort basert på typiske verdier for stikkrenner under jernbanen, gitt i teknisk regelverk ved Bane NOR (2015). Det er tatt utgangspunkt i to kvadratiske stikkrenner med størrelse på henholdsvis 600x600 og 1000x1000 mm. Stikkrennekapasitet beregnes med antatte egenskaper:

- Helning 6 ‰
- Lengde 6 m
- Overfyllingshøyde 1 m

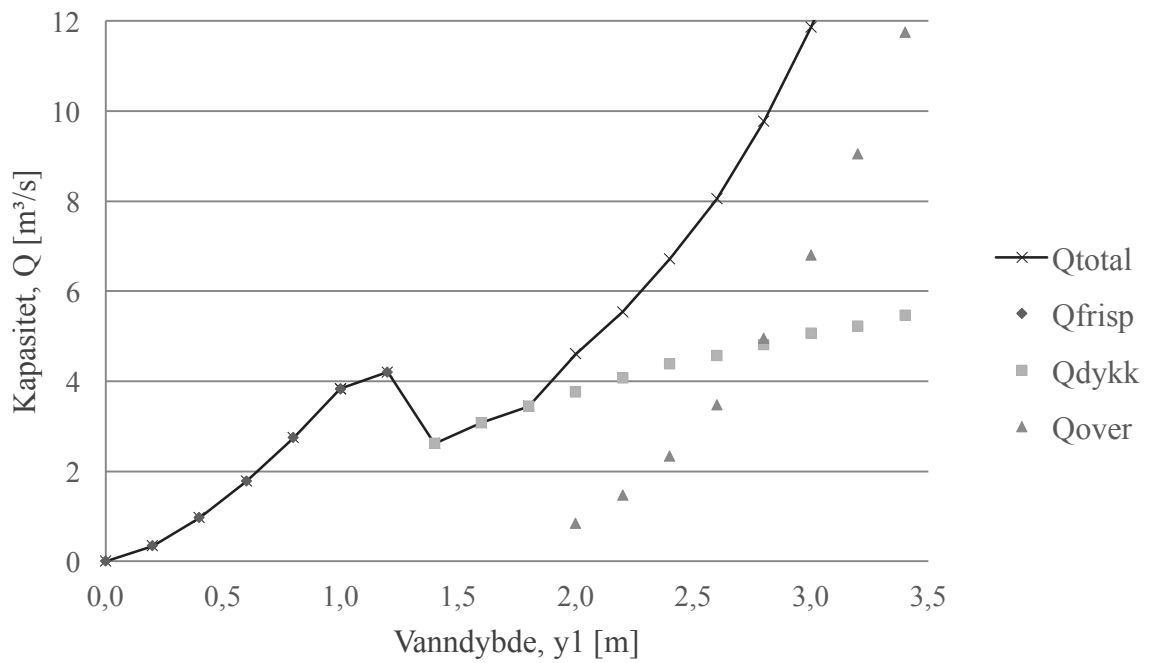
Stikkrenner med gitte egenskaper vil gi forhold hvor kapasiteten bestemmes ved innløpskontroll. Et fåtall stikkrenner vil ha utløpskontroll, dette vil kun være aktuelt ved helning tilnærmet 0 ‰ eller ved dykket inn- og utløp. Det er anslått at omtrent 9 av 10 stikkrenner langs jernbanen i Norge er innløpskontrollert (L.Lia, pers. medd. 29.05.2017). På bakgrunn av dette utføres videre vurderinger av stikkrennekapasitet med utgangspunkt i innløpskontroll.

### 6.2.1 Varierende vannstand

Beregninger utføres med utgangspunkt i kritisk strømning ved innløp fram til innløpet dykkes. Ved dykket innløp bestemmes kapasitet ved formel (14) da stikkrennene er hydraulisk korte. Til slutt vil det skje overløp over veg/jernbane, som bestemmes med utgangspunkt i formel (15). Tabell med beregningsresultater er gitt i vedlegg 16 og resultatene er presentert grafisk i figur 16 og figur 17.



Figur 16: Kapasitet for stikkrenne med størrelse 600x600 mm.



Figur 17: Kapasitet for stikkrenne med størrelse 1000x1000 mm.

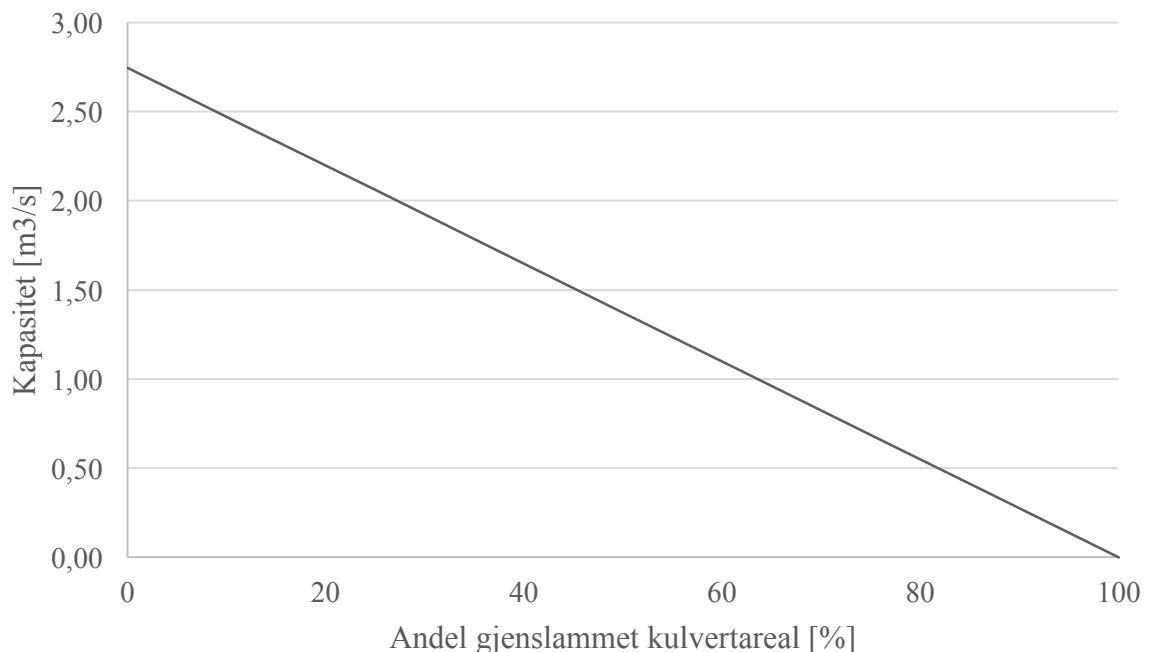
Fra figurene er det gitt at stikkrennekapasiteten reduseres ved dykket innløp. Maksimal kapasitet for stikkrenne med tverrsnitt 600x600 og 1000x1000 mm er funnet å være henholdsvis 1,17 m<sup>3</sup>/s og 4,20 m<sup>3</sup>/s før vann vil gå i overløp over veg/jernbane. Maksimal kapasitet er funnet å være ved frispelstrømning for begge stikkrenner.

### 6.2.2 Varierende tverrsnittareal

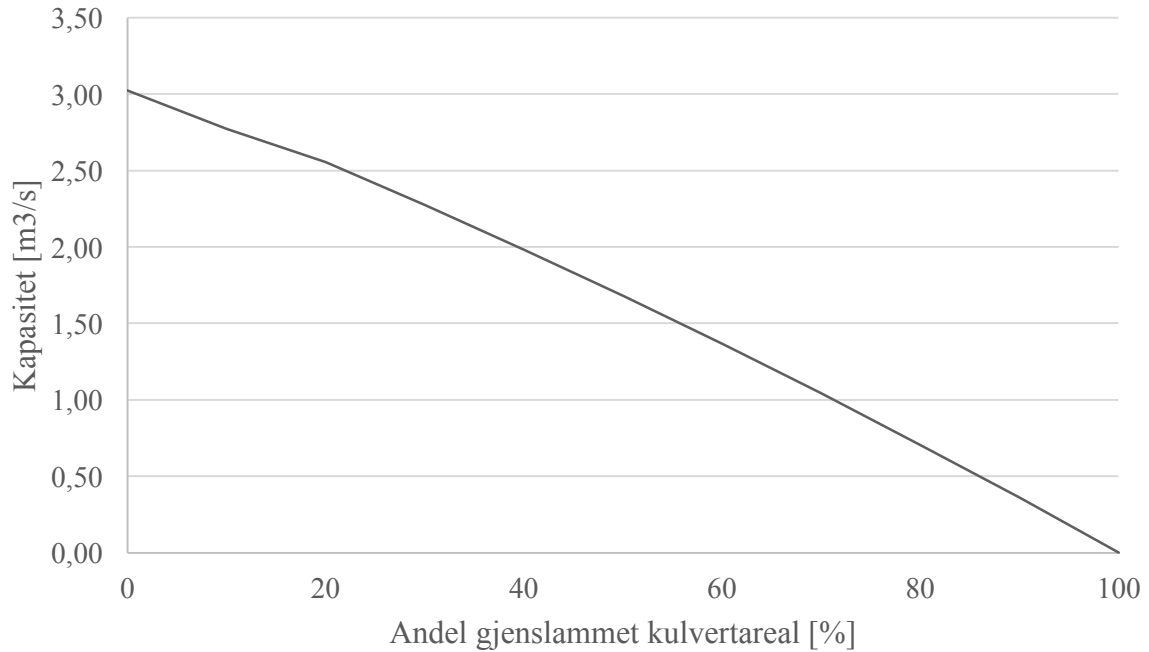
Stikkrenner vil ofte få redusert tverrsnittareal med tiden som følge av igjenslamming. På bakgrunn av dette vurderes sammenhengen mellom kapasitetsendringer og dimensjonsendringer for stikkrenner. Beregninger utføres med utgangspunkt i stikkrenne med tverrsnitt 1000x1000 mm og vanddybde med ulike strømningstyper basert på figur 17. Vanddybde er valgt til

- 0,8 m (frispeilstrømning)
- 1,6 m (dykket innløp)

Kapasitetsberegningene er presentert i tabellform i vedlegg 18, og resultatene er gitt grafisk i figur 18 og figur 19.



Figur 18: Kapasitet ved frispelstrømning og varierende tverrsnittareal.



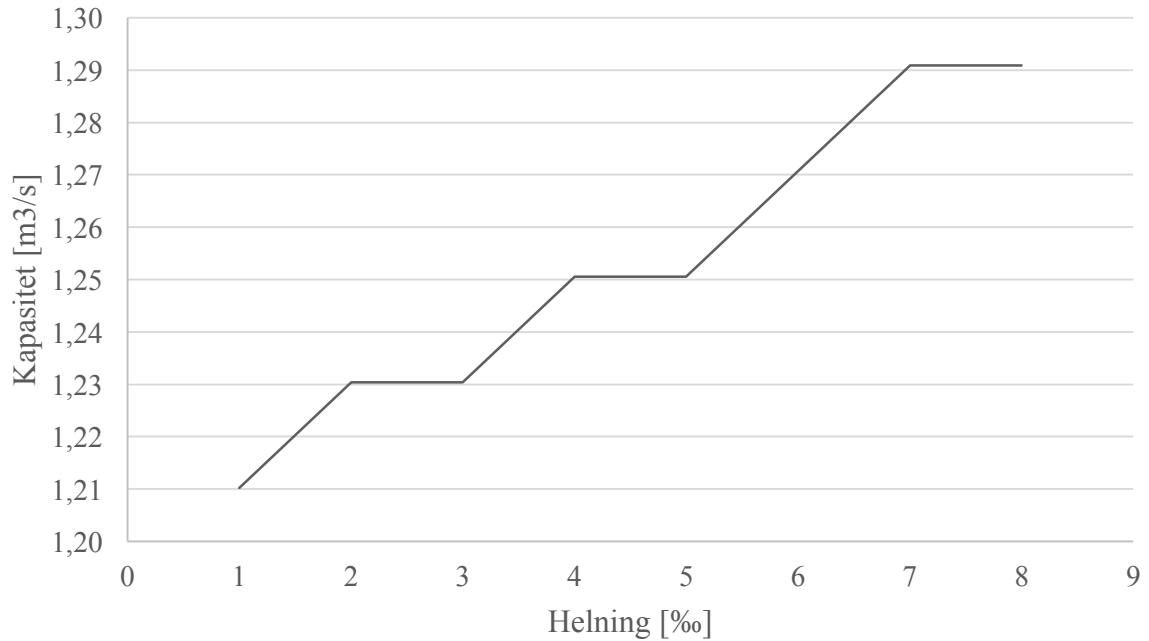
Figur 19: Kapasitet ved dykket innløp og varierende tverrsnittareal.

Ved prosentvis reduksjon av tverrsnittareal kan det konkluderes med at kapasiteten til stikkrenna/kulverten synker lineært ved frispeilstrømning, og tilnærmet lineært ved dykket innløp. Ved dykket innløp synker kapasiteten noe raskere enn ved frispeilstrømning, hvorav kapasiteten reduseres raskere desto større andel av kulvertarealet som er gjenslammet.

### 6.2.3 Varierende helning

Stikkrennekapasitet ved varierende helning bestemmes kun ved dykket innløp da kapasitet ved frispeilstrømning ikke påvirkes av helning. Ved dykket innløp vil helning ha betydning for bestemmelse av vannføringskoeffisient,  $C_D$ . Vannføringskoeffisienten bestemmes med utgangspunkt i  $r/D$ , hvor  $r$  refererer til avrunding av innløpet. Figur og tabell gitt i vedlegg 16 benyttes ved bestemmelse av  $C_D$  og  $r/D$ .

For stikkrenne med dimensjon 1000x1000 mm vil lengde/dybde-forhold ( $L/D$ ) være 6. Dette gir  $r/D \approx 0,06$  for alle helninger da lengde/dybde-forholdet er relativt lavt, som videre gir konstant kapasitet ved varierende helning. Ved mindre tverrsnittareal vil  $L/D$  være større og  $r/D$  vil videre variere. På bakgrunn av dette er det kun gjort beregninger for stikkrenne med tverrsnitt 600x600. Helning er variert fra 1 – 8 ‰. Resultatene er presentert i figur 20.



Figur 20: Kapasitet for stikkrenne med tverrsnitt 600x600 mm ved varierende helning.

Fra figuren er det gitt at helning påvirker kapasiteten i liten grad da kapasiteten er innen intervallet 1,2-1,3 m<sup>3</sup>/s ved varierende helning fra 1-8 ‰.

### 6.3 Oppsummering og diskusjon

Ved varierende vannstand er maksimal kapasitet gitt ved frispelstrømning for begge stikkrenner. Dette skyldes trolig at kapasiteten ved frispelstrømning ikke påvirkes av innløpstap i like stor grad som ved dykket innløp. I tillegg vil friksjon påvirke kapasiteten i større grad ved dykket innløp, da større andel av vannet vil være i kontakt med rørveggen.

Kapasiteten reduseres tilnærmet lineært ved prosentvis reduksjon av tverrsnittareal, hvorav kapasiteten er funnet å reduseres noe raskere ved dykket innløp. Bestemmelser ved teknisk regelverk i Bane NOR tilsier at stikkrenner skal renskes når 20 % av stikkrennas tverrsnitt er gjenslammet (Bane NOR, 2015). Basert på resultatene gitt i figur 18 og figur 19 tilsier dette en kapasitetsreduksjon på 0,46 m<sup>3</sup>/s ved frispelstrømning og 0,47 m<sup>3</sup>/s ved dykket innløp.

Ved beregninger er det tatt utgangspunkt i innløpskontroll da flertallet av stikkrenner i forbindelse med jernbanen er kortere enn 15-20 meter med helning > 4 ‰. Ved innløpskontroll bestemmes kapasiteten i stor grad av innløpsutforming, i tillegg til tverrsnittareal og vannstand

ved innløpet. Ved større kompliserte kulverter kan det derfor spares betydelige beløp ved å redusere tverrsnittet og heller konstruere et spesialutformet innløp (Statens Vegvesen, 2014)

#### **6.4 Konklusjon**

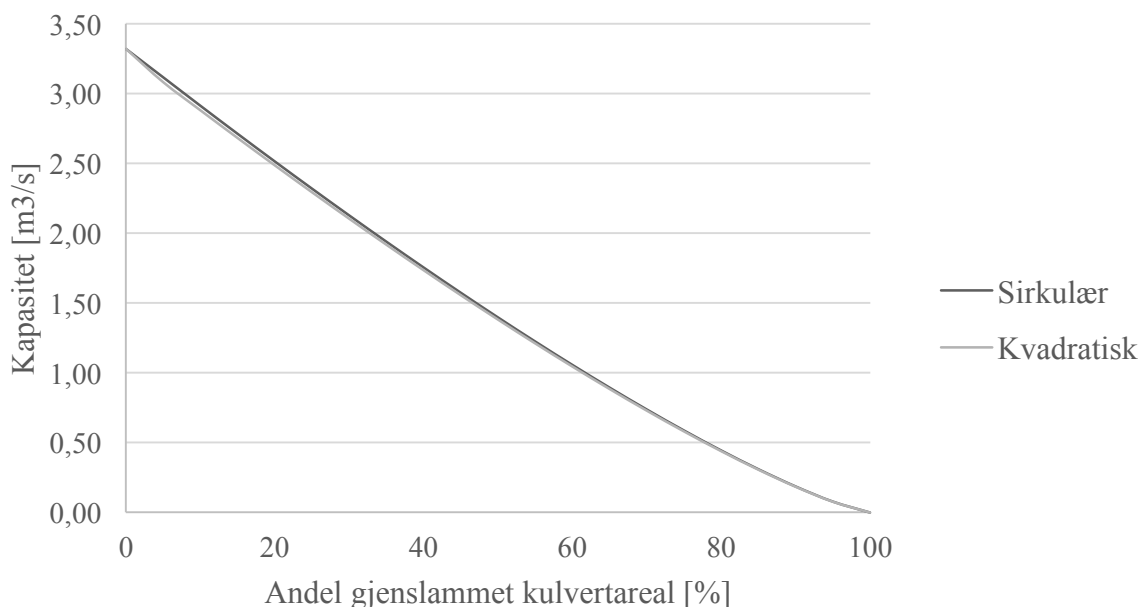
Fra kapasitetsberegninger er det funnet at vannstand ved innløp og tverrsnittareal har stor innvirkning på stikkrenners kapasitet. Kapasiteten reduseres betraktelig ved redusert tverrsnittareal. Helning har liten betydning for stikkrennekapasitet ved innløpskontroll.



## 7 STIKKRENNEKAPASITET VED SVARTTJØNNBEKKEN

Fra teknisk regelverk ved Bane NOR er det bestemt at stikkrenner skal dimensjoneres med 200-års gjentakintervall (Bane NOR, 2015). Videre anbefaler Statens Vegvesen (2014) at rette stikkrenner med lengde mindre enn 15-20 m bør dimensjoneres slik at man får strømningssituasjon med innløpskontroll og frispeilstrømning. På bakgrunn av dette dimensjoneres stikkrenne ved Svarttjønnbekken med 200-års gjentakintervall, innløpskontroll og frispeilstrømning. Vannstand ved innløpet er antatt å være lik høyde på stikkrenne for å oppnå frispeilstrømning. Dette gir relativ vannstand,  $y_1/D = 1$ . Beregninger baseres videre på kritisk dybde ved innløpet, hvorav kapasitet beregnes ved  $Q = A \cdot v_c$ .

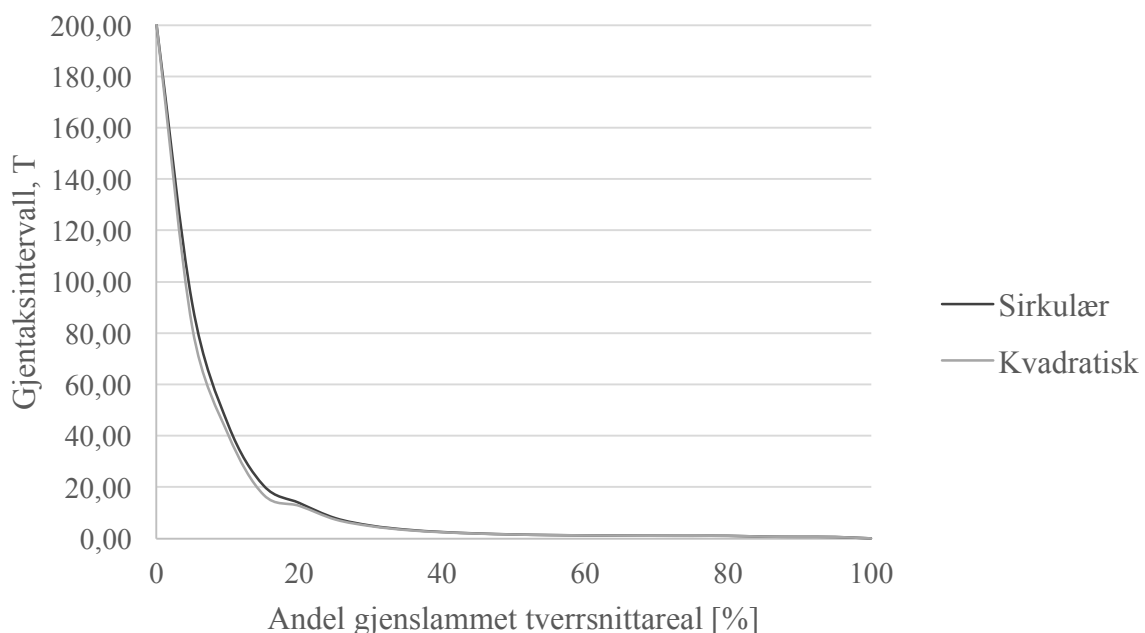
Resultat fra flomfrekvensanalyse ved Svarttjønnbekken gir vannføring ved 200-års gjentakintervall lik  $3,32 \text{ m}^3/\text{s}$  ved generalisert ekstremverdifordeling for data med 3-timers tidsintervall. Nødvendig stikkrennediameter bestemmes videre til 1,04 meter. Ved kvadratisk tverrsnitt er nødvendig høyde og bredde på stikkrenna lik 0,94 meter. Videre beregnes kapasiteten ved redusert tverrsnittareal. Resultatene er presentert i tabell i vedlegg 19 og grafisk i figur 21.



Figur 21: Kapasitet for stikkrenne ved Svarttjønnbekken med redusert tverrsnitt.

Bane NOR tillater i dag 20 % gjenslammet tverrsnittareal av stikkrenner før rensk er påkrevd. For eksempelstikkrenne ved Svarttjønnbekken tilsvarer dette diameter lik 0,93 ved sirkulær stikkrenne og høyde og bredde lik 0,84 ved kvadratisk stikkrenne. Ved 20 % redusert tverrsnitt er kapasiteten for sirkulær og kvadratisk stikkrenne bestemt til henholdsvis 2,51 m<sup>3</sup>/s og 2,48 m<sup>3</sup>/s.

Med utgangspunkt i resultatene fra flomfrekvensanalyse kan det bestemmes hvilket gjentaksintervall den reduserte stikkrennekapasiteten tilsvarer. Interpolasjon av verdier gitt i vedlegg 9 gir nytt dimensjonerende gjentaksintervall for stikkrennene ved varierende tverrsnittareal. Resultatene er gitt i figur 22.



Figur 22: Dimensjonerende gjentaksintervall for stikkrenne ved Svarttjønnbekken med redusert tverrsnitt.

Fra figur 22 er det gitt at dimensjonerende gjentaksintervall reduseres eksponentielt med reduksjon av tverrsnittareal. Ved 20 % redusert tverrsnittareal er dimensjonerende gjentaksintervall bestemt til 14 og 12 år for henholdsvis sirkulær og kvadratisk stikkrenne ved Svarttjønnbekken. Det kan dermed konkluderes med at rensk er vesentlig for å opprettholde kapasitet av stikkrenner.

## 8 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

Anbefalt metode for hydrologisk dimensjonering varierer avhengig av datatilgjengelighet, størrelse og geografisk forhold for nedbørfelt, samt tidsperspektiv. NVE anbefaler først å benytte formelverket for å estimere flomverdier og videre utføre flomfrekvensanalyse for å beregne tilløpsflommer med gitte gjentakintervall. For områder med dårlig datagrunnlag kan flomberegninger baseres på den rasjonale metode ved svært små felt og PQRUT for større felt. Metodene er vurdert med utgangspunkt i observasjonsdata fra Svarttjønnbekken, hvor resultater fra flomfrekvensanalyse er lagt til grunn for evalueringen. Resultatene gir betydelig overestimering ved den rasjonale metode og underestimering ved PQRUT. Dette kan skyldes nedbørfeltets størrelse, som er større enn anbefalt ved bruk av den rasjonale metode og antakelig for lite til at modellen ved PQRUT responderer tilstrekkelig. En annen årsak kan være at begge metodene baseres på at nedbør med gitt gjentakintervall genererer flom med tilsvarende gjentakintervall. For flertallet av observerte flomhendelser ved Svarttjønnbekken er det ikke funnet samsvar mellom gjentakintervall for nedbør og vannføring. Dette kan skyldes stor variasjon i varighet på nedbør som genererer flom, i tillegg til faktorer som snøfordeling og metningsgrad i grunnen.

Med utgangspunkt i de seks største verdiene for maksimal årsnedbør ved Svarttjønnbekken er ingen funnet å generere store flomhendelser. Dette indikerer at ekstreme nedbørhendelser ikke nødvendigvis genererer ekstreme flomhendelser, og bekrefter at gjentakintervall for nedbør og vannføring ikke nødvendigvis samsvarer. Det kan dermed konkluderes med at forhold i nedbørfeltet, som metningsgrad og snøfordeling, har stor innvirkning på flomstørrelser. På bakgrunn av dette er det behov for en større forståelse av mekanismen i nedbørfelt, og hydrologiske dimensjoneringsmetoder med mekanismene innebygd.

I Norge er nedbør i form av snø høyst aktuelt, spesielt langs jernbanen, som går over flere fjellstrekninger og stort sett utenfor urbane strøk. Dette vil påvirke samsvaret mellom gjentakintervall for nedbør og vannføring da all nedbør ikke vil generere flom direkte. Snøakkumulering kan dermed være en stor feilkilde ved bruk av nedbør-avløpsmodeller for hydrologisk dimensjonering langs jernbanen. For små nedbørfelt er det til gjengjeld funnet at de største flommene i hovedsak genereres av regn. Snøakkumulering vil altså være et mer aktuelt problem for større nedbørfelt.

Observasjonsdata for nedbør og vannføring er ofte begrenset langs jernbanestrekninger i Norge. Dette gjør det vanskelig å benytte formelverk og flomfrekvensanalyse da metodene er avhengig av gode data. Den rasjonale metode og PQRUT er også avhengig av observasjonsdata for nedbør, presentert i henholdsvis IVF-kurve eller design hyetogram. På bakgrunn av dette kan feil i nedbørdata være en stor feilkilde ved modellene, hvorav det er funnet å være store lokale nedbørvariasjoner på relativt korte avstander. Ved jernbanestrekninger er det ofte store avstander mellom nedbørstasjoner med tilstrekkelig lange nedbørserier. På Nordlandsbanen kan avstandene være opp mot 50 mil. På bakgrunn av manglende observasjonsdata kan langsiktige simuleringsmetoder for nedbør være et godt alternativ. Simulerte nedbørserier kan benyttes som input til modellene for å bestemme vannføring. Slike metoder er fordelaktig da det ikke antas samsvar mellom gjentaksintervall for nedbør og avrenning. Datasimuleringsmetoder er ofte mer avanserte og tidkrevende, hvorav en eventuell implementering krever god opplæring og oppfølging.

Ved kartlegging av stikkrenner langs jernbanestrekninger er det funnet at manglende vedlikehold er et stort problem. Tidligere studier har funnet at rashendelser ved jernbanen ofte skyldes at kapasitet i praksis er betydelig mindre enn dimensjonert stikkrennekapasitet grunnet igjenslamming. Teknisk regelverket ved Bane NOR krever i dag at stikkrenner har dimensjonerende gjentaksintervall lik 200 år. Videre kreves rensk av stikkrenner ved 20 % redusert tverrsnittareal. Fra kapasitetsberegninger er liten reduksjon i tverrsnittareal funnet å ha stor innvirkning på kapasitet og dimensjonerende gjentaksintervall, som reduseres betraktelig. Beregningene er gjennomført med utgangspunkt i dimensjonerende gjentaksintervall lik 200 år ved fullt tverrsnittareal. Ved 20 % redusert tverrsnittareal er dimensjonerende gjentaksintervall for sirkulær og kvadratisk stikkrenne funnet å være henholdsvis 14 og 12 år, altså redusert med 186 og 188 år. Dette påpeker viktigheten av vedlikehold og rensk av stikkrenner.

## 9 VIDERE ARBEID

Evaluering av metoder er gjort med utgangspunkt i kun et observasjonsområde. Ved videre arbeid bør metodene vurderes ved flere felt med ulike geografiske egenskaper og størrelser. Svartjønnbekken er funnet å ha høy dempingseffekt, som vil påvirke resultatene ved noen av metodene betraktelig.

Observerte data fra Svartjønnbekken ligger i grensen for hva som er tilstrekkelig for å utføre flomfrekvensanalyse, spesielt nedbørdata. Det kan utføres flomfrekvensanalyse ved flere stasjoner i området for å kontrollere at enkeltserier ikke gir ekstreme fordelinger. Eventuelt kan data med 30-minutters tidsintervall akkumuleres til 3-timerdata for å forlenge nedbørdata med 3-timers tidsintervall. Dette vil også gi mulighet for å se på flomhendelser med utgangspunkt i 3-timersdata og 30-minuttersdata ved samme tidspunkt, og dermed gi bedre utgangspunkt for sammenligning.

I denne oppgaven er det funnet at ekstreme nedbørhendelser ikke nødvendigvis genererer ekstreme flomhendelser. Ved videre arbeid vil en utvidet vurdering av denne sammenhengen være aktuell, hvor lengre dataserier for nedbør evalueres. Dette kan gi en bedre forståelse av feltmekanisme.



## REFERANSER

- ANDERSEN, J. H., HJUKSE, T., ROALD, L. & SÆLTHUN, N. R. 1983. Hydrologisk modell for flomberegninger. NVE.
- BANE NOR. 2015. *Underbygging/Prosjektering og Bygging/Drenering* [Online]. Teknisk regelverk Bane NOR. Available: [https://trv.jbv.no/wiki/Underbygning/Prosjektering\\_og\\_bygging/Drenering#Dimensjonerende\\_vannf.C3.B8ring](https://trv.jbv.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Drenering#Dimensjonerende_vannf.C3.B8ring) [Accessed 12. oktober 2016].
- BASBERG, L. 2016. *FlomQ* [Online]. Energi Norge. Available: <https://www.energinorge.no/energiforskning/fornybar-energiproduksjon/vannkraft/dam/flomq/> [Accessed 15. mai 2017].
- FRENCH, R. 1994. *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill international editions.
- FRONTÉRI, A. U. 2015. *Statistiske modelleringer i det europeiske gassmarkedet*. The University of Bergen.
- HAILEGEORGIS, T. & ALFREDSEN, K. 2016. Analyses of extreme precipitation and runoff events including uncertainties and reliability in design and management of urban water infrastructure. *Journal of Hydrology*.
- HANSEN-BAUER, I., FØRLAND, E. J., HADDELAND, I., HISDAL, H., MAYER, S., NESJE, A., NILSEN, J. E. Ø., SANDVEN, S., SANDØ, A. B., SORTEBERG, A. & ÅDLANDSVIK, B. 2015. Klima i Norge 2100. Miljødirektoratet.
- HEFRE, H. & HØYDAL, Ø. 2015. Detalj kartlegging Stjørdal-Steinkjer. Bane NOR.
- HISDAL, H., THORARINSDOTTIR, T. L., ALFREDSEN, K., LAWRENCE, D., LUNDQUIST, D., LØLAND, A., MIDTTØMME, G. H., TVEITO, O. E. & WILSON, D. 2013. Status for og veier til bedre flomestimering i Norge. *Norsk Regnesentral*.
- KLIMA2050. 2017. *About KLIMA2050* [Online]. Available: <http://www.klima2050.no/what-we-do/> [Accessed 15. mai 2017].
- LAWRENCE, D., PAQUET, E., GAILHARD, J. & FLEIG, A. 2014. Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall–snowmelt flood regimes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1283-1298.
- LEUCH, C. 2016. *Runoff modelling of small-scale catchments in Soknedalen*. Bachelor, NTNU.

- LINDHOLM, O., ENGAN, J. A., RAPP, Ø., PETERSEN-ØVERLEIR, A. & MARKHUS, E. 2003. Revurdering av beregningskriterier for avløpssystemer, flom i kommunale avløpssystem. NIVA.
- LINSLEY, R. K. 1986. Flood estimates: how good are they? *Water Resources Research*, 22.
- LUNDQUIST, D. 2016. Flomberegninger i praksis. *FlomQ Workshop*. Trondheim.
- MIDTTØMME, G., PETTERSON, L., HOLMQVIST, E., NØTSUND, Ø., HISDAL, H. & SIVERTSGÅRD, R. 2011. Retningslinjer for flomberegninger. *NVE Retningslinjer*, 4, 2011.
- MYRABØ, S. Håndtering av flom og vann på avveie. Vann på ville veier, 2014 Gardemoen. NIFS.
- MYRABØ, S., VIKLUND, M., ØVRELID, K., ØYDVIN, E. K., PETKOVIC, G., HUMSTAD, T., AUNAAS, K., YHAKUR, V. & DOLVA, B. K. 2016. NIFS - sluttrapport. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- NVE 2010. *Vassdragshåndboka. Håndbok i Vassdragsteknikk*, Trondheim, Tapir Akademisk Forlag.
- PEDERSEN, B. & SKARPAAS, O. 2012. Statistiske egenskaper til Naturindeks for Norge. Usikkerhet i datagrunnlaget og sensitivitet.
- STATENS VEGVESEN 2014. Håndbok N200 Vegbygging.
- STENIUS, S. & GLAD, P. A. 2015. anbefalte metoder for flomberegninger i små uregulerte felt. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- STENIUS, S., GLAD, P. A., REITAN, T., WANG, T. C., TVEDALEN, A. K., REINEMO, P. & AMLAND, S. 2015a. Sammenligning av metoder for flomberegninger i små uregulerte felt. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- STENIUS, S., GLAD, P. A., WANG, T. K. & VÆRINGSTAD, T. 2015b. Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- STENIUS, S., GLAD, P. A. & WILSON, D. 2014. Karakterisering av flomregimer. NIFS: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- SØNDENAA, M. 2016. *Hydrologiske dimensjoneringsmetoder i små uregulerte nedbørfelt*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- WINTER, L., LINDE, J. J., JENSEN, H. T., MATHIASSEN, L. L. & JOHANSEN, N. B. 2011. *Afløbsteknikk*, Polyteknisk Forlag.



## INNHOLDSLISTE VEDLEGG

Vedlegg 1: NEVINA-rapport for Svarttjønnbekken.....	ii
Vedlegg 2: Uavhengige flomtopper ved Svarttjønnbekken for perioden 1973-2011 .....	iii
Vedlegg 3: Grafisk framstilling av flomhendelser med 3-timers tidsintervall .....	v
Vedlegg 4: Grafisk framstilling av flomhendelser med 30-minutters tidsintervall .....	ix
Vedlegg 5: Døgnmiddeltemperaturer for utvalgte flomhendelser .....	xi
Vedlegg 6: Årlig maksimal vannføring for Svarttjønnbekken .....	xii
Vedlegg 7: Årlig maksimal nedbør for Svarttjønnbekken.....	xv
Vedlegg 8: R-kode brukt ved flomfrekvensanalyse.....	xvii
Vedlegg 9: Flomfrekvensanalyse for vannføring .....	xix
Vedlegg 10: Flomfrekvensanalyse for nedbør.....	xxi
Vedlegg 11: IVF-kurve for Risvollan, Trondheim .....	xxiii
Vedlegg 12: IVF-kurve for Voll, Trondheim .....	xxiv
Vedlegg 13: Design hyetogram for Voll.....	xxv
Vedlegg 14: Design hyetogram for Svarttjønnbekken basert på ekstremnedbør .....	xxvii
Vedlegg 15: Hydrogram for kalibrering ved PQRUT .....	xxviii
Vedlegg 16: Oppslagsverk for stikkrennekapasitetsberegning.....	xxix
Vedlegg 17: Stikkrennekapasitetsberegninger ved varierende vannstand.....	xxx
Vedlegg 18: Stikkrennekapasitetsberegninger ved varierende tverrsnittareal.....	xxxii
Vedlegg 19: Kapasitet og gjentaksintervall ved redusert tverrsnittareal. ....	xxxiii

# Vedlegg 1: NEVINA-rapport for Svarttjønnbekken

## Lavvannskart

Vassdragsnr.: 123.2C  
 Kommune: Trondheim  
 Fylke: Sør-Trøndelag  
 Vassdrag: VIKELVA

Vannføringsindeks, se merknader

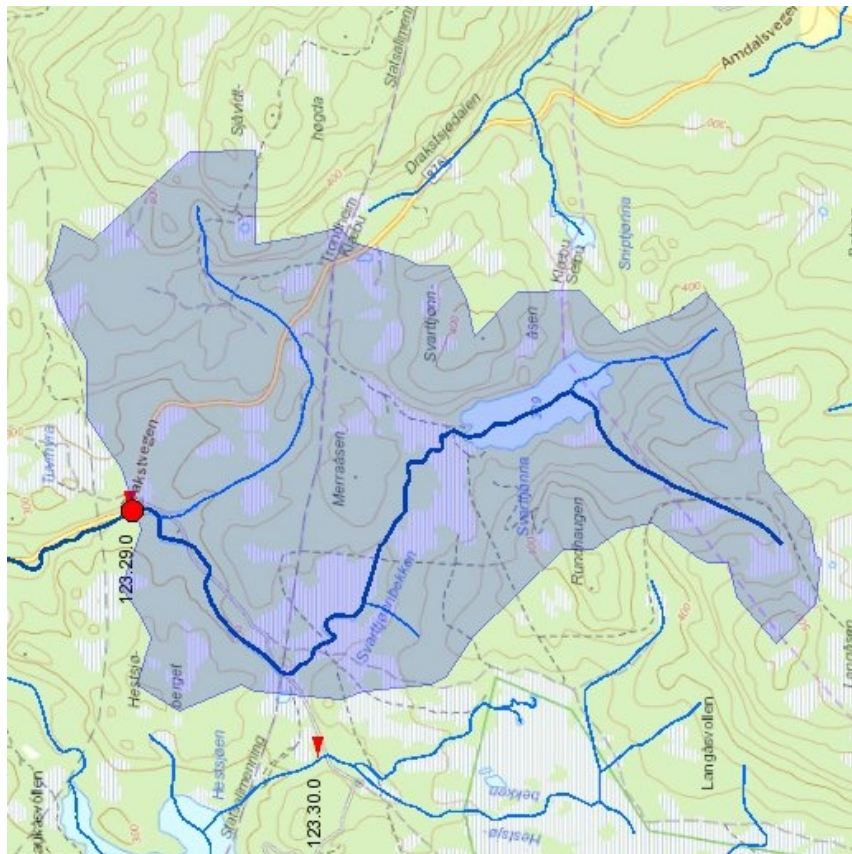
Middelvannføring (61-90)	27.9 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	4.7 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	4.7 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	5.0 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	4.6 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	9.8 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0.4

### Klima

Klimaregion	Midt
Årsnedbør	1000 mm
Sommernedbør	434 mm
Vinternedbør	565 mm
Årstemperatur	3.5 °C
Sommertemperatur	9.6 °C
Vintertemperatur	-0.9 °C
Temperatur Juli	11.6 °C
Temperatur August	11.4 °C

Feltparametere	
Areal (A)	3.5 km <sup>2</sup>
Effektiv sjø (S <sub>eff</sub> )	0.8 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	3.7 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	43.2 m/km
Elvegradient <sub>1085</sub> (G <sub>1085</sub> )	25.5 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	2.6 km
H <sub>min</sub>	280 moh.
H <sub>10</sub>	306 moh.
H <sub>20</sub>	318 moh.
H <sub>30</sub>	329 moh.
H <sub>40</sub>	334 moh.
H <sub>50</sub>	341 moh.
H <sub>60</sub>	352 moh.
H <sub>70</sub>	366 moh.
H <sub>80</sub>	385 moh.
H <sub>90</sub>	414 moh.
H <sub>max</sub>	511 moh.
Bre	0.0 %
Dyrket mark	0.0 %
Myr	15.1 %
Sjø	2.9 %
Skog	81.7 %
Snaufjell	0.0 %
Urban	0.0 %

1) Verdien er editert



Norges vassdrags- og energidirektorat



Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
 Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannindekser. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

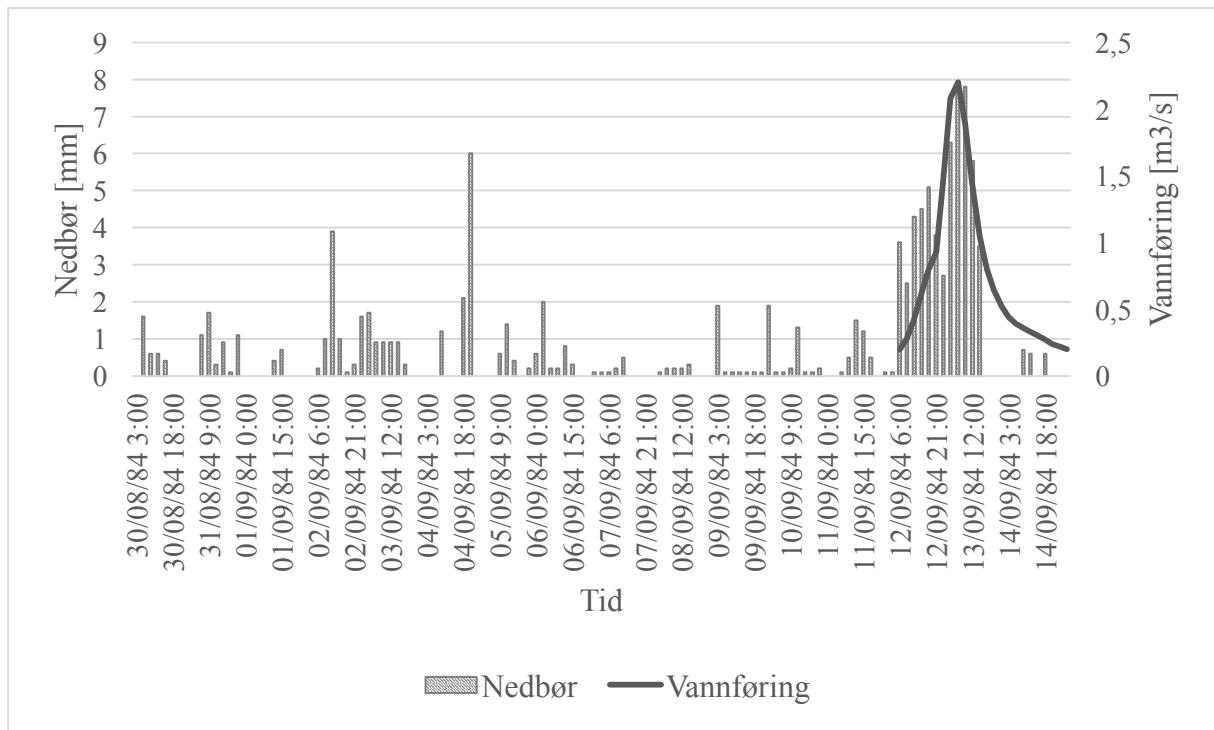
I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

Vedlegg 2: Uavhengige flomtopper ved Svarttjønnbekken for perioden 1973-2011

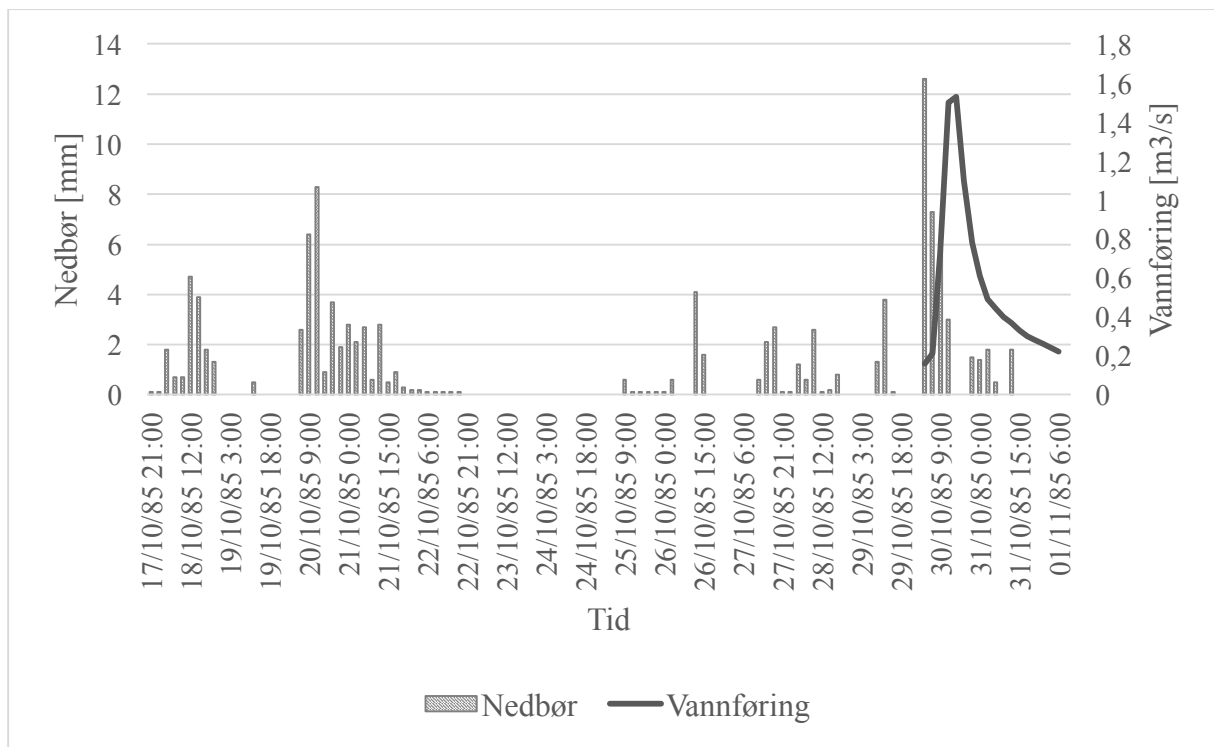
<b>Måned</b>	<b>Dato</b>	<b>Flomtopp [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>Januar</b>	14/01-1992	1,55
	31/01-2006	2,89
<b>Februar</b>	04/02-1999	1,95
	25/02-1998	2,32
<b>Mars</b>	31/03-1990	2,11
<b>April</b>	09/04-1999	1,73
<b>Mai</b>	12/05-1981	2,18
	20/05-1976	1,81
	22/05-1975	1,76
<b>Juni</b>		
<b>Juli</b>	05/07-1982	1,6
	20/07-2009	1,83
	22/07-1999	1,67
<b>August</b>	01/08-1989	1,75
	02/08-1984	1,63
	21/08-1988	2,07
<b>September</b>	12/09-1984	2,08
	13/09-1973	1,97
	18/09-1988	1,64
	22/09-2004	2,73
	23/09-1997	1,73
<b>Oktober</b>	07/10-1975	1,56
	08/10-1992	2,28
	24/10-1993	1,55
	25/10-1973	1,92
	26/10-1983	2,85
	30/10-1985	1,53
<b>November</b>	03/11-2007	1,71

	05/11-1978	1,55
	15/11-2004	1,81
	24/11-1988	1,80
<b>Desember</b>	10/12-1987	2,22
	18/12-2003	1,52

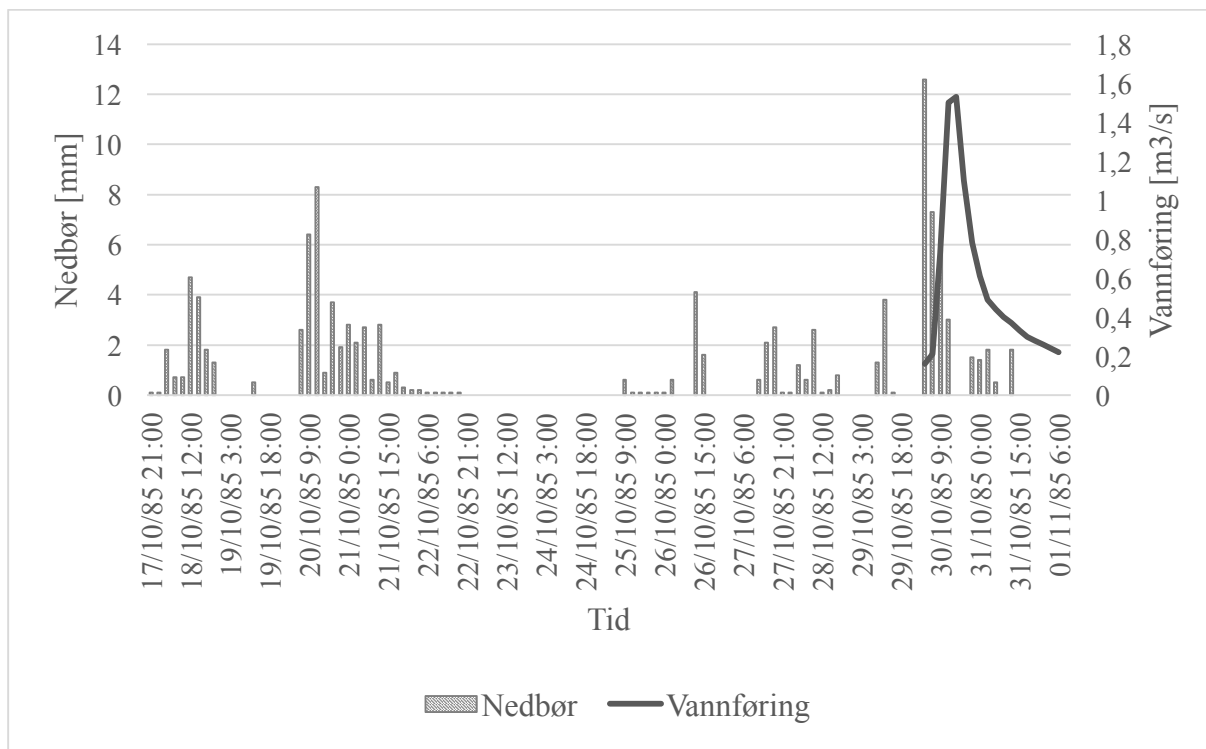
### Vedlegg 3: Grafisk framstilling av flomhendelser med 3-timers tidsintervall



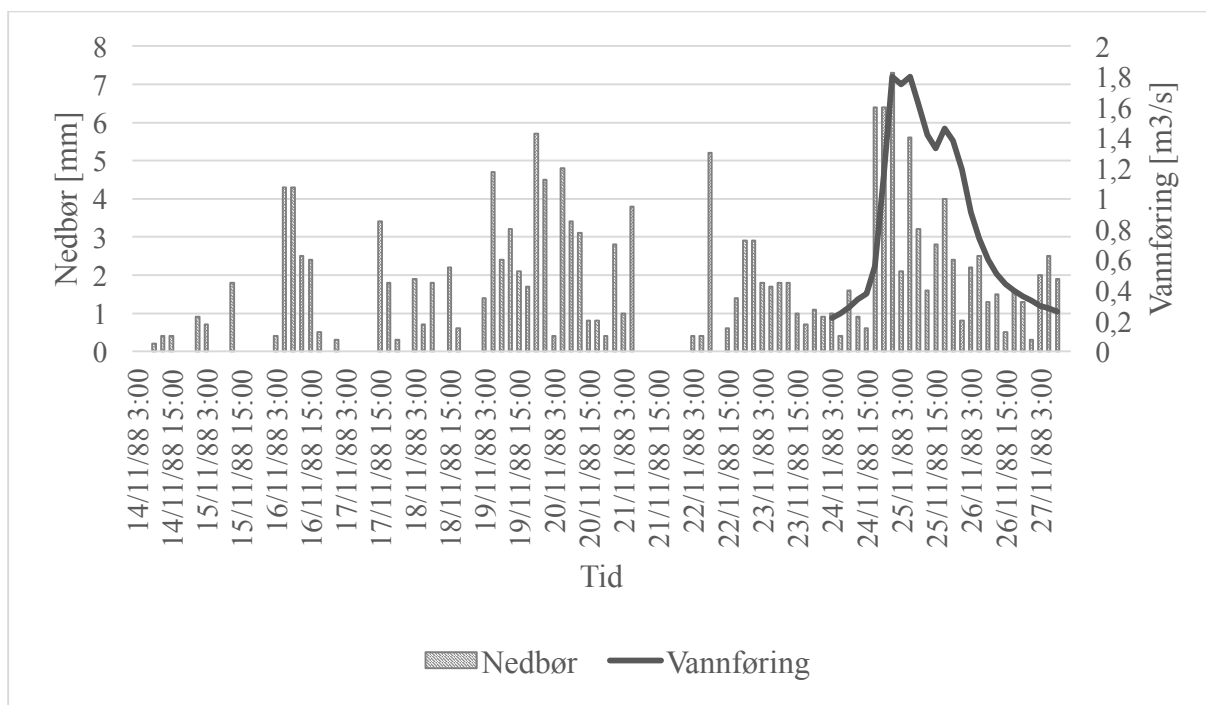
Figur 3.1: Flomhendelse 1984



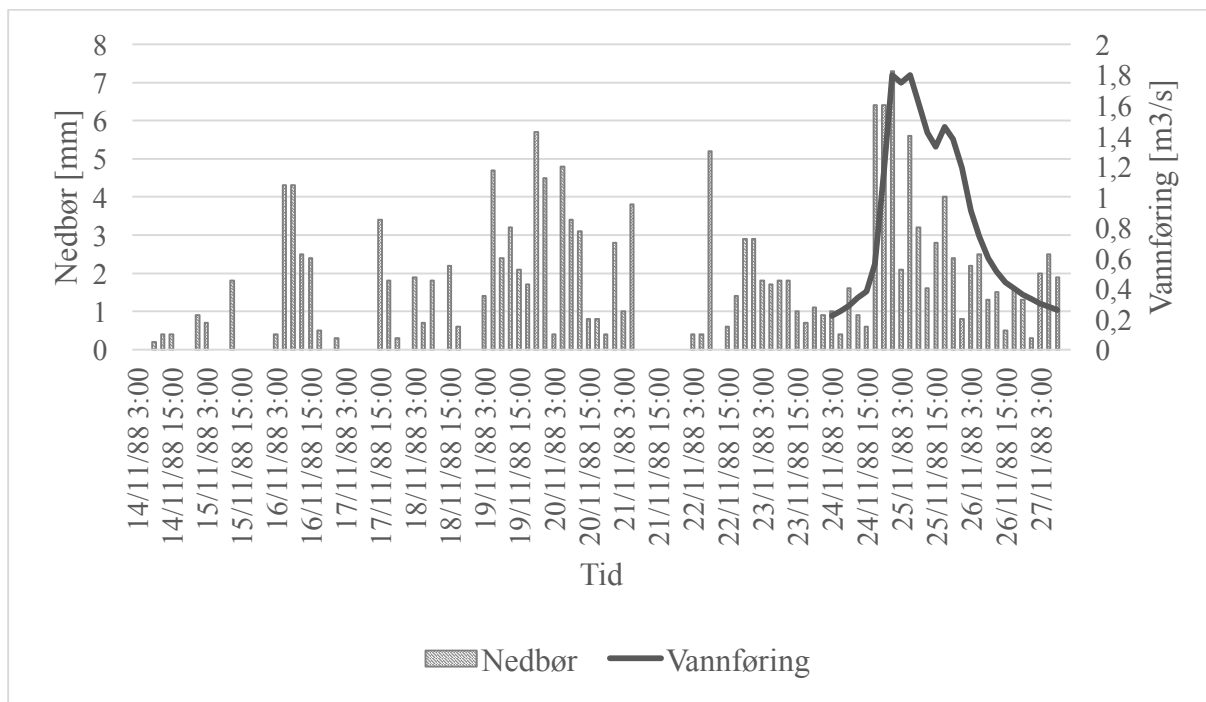
Figur 3.2: Flomhendelse 1985



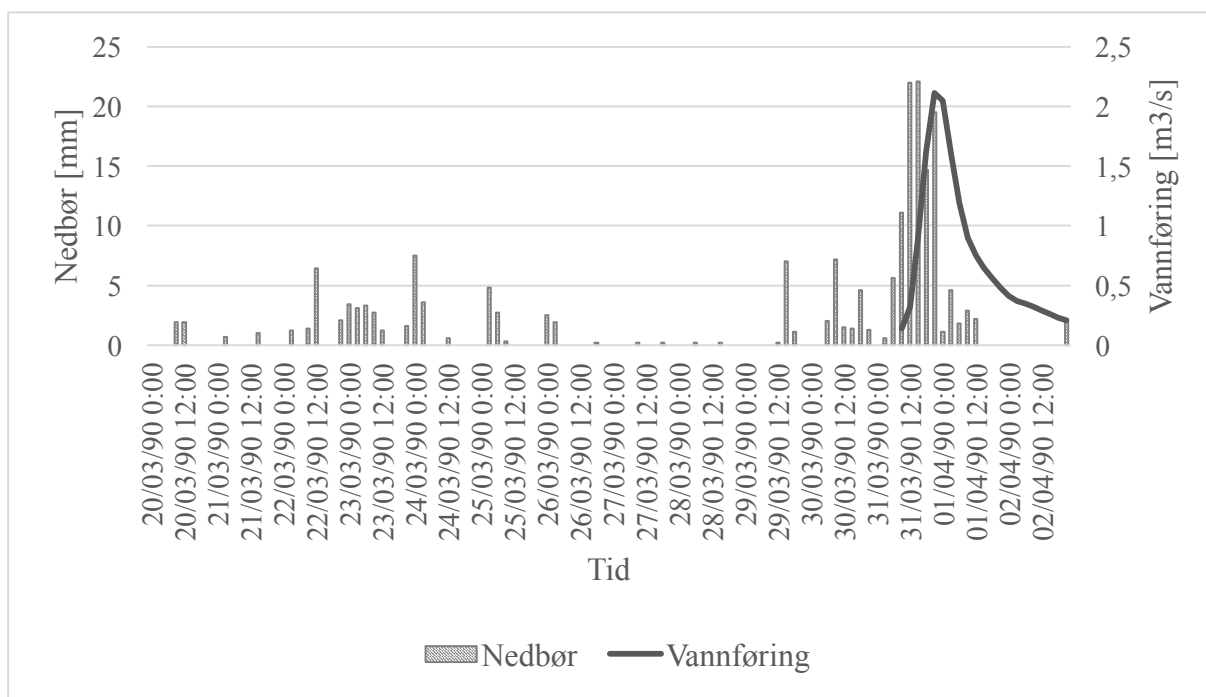
Figur 3.3: Flomhendelse 1987



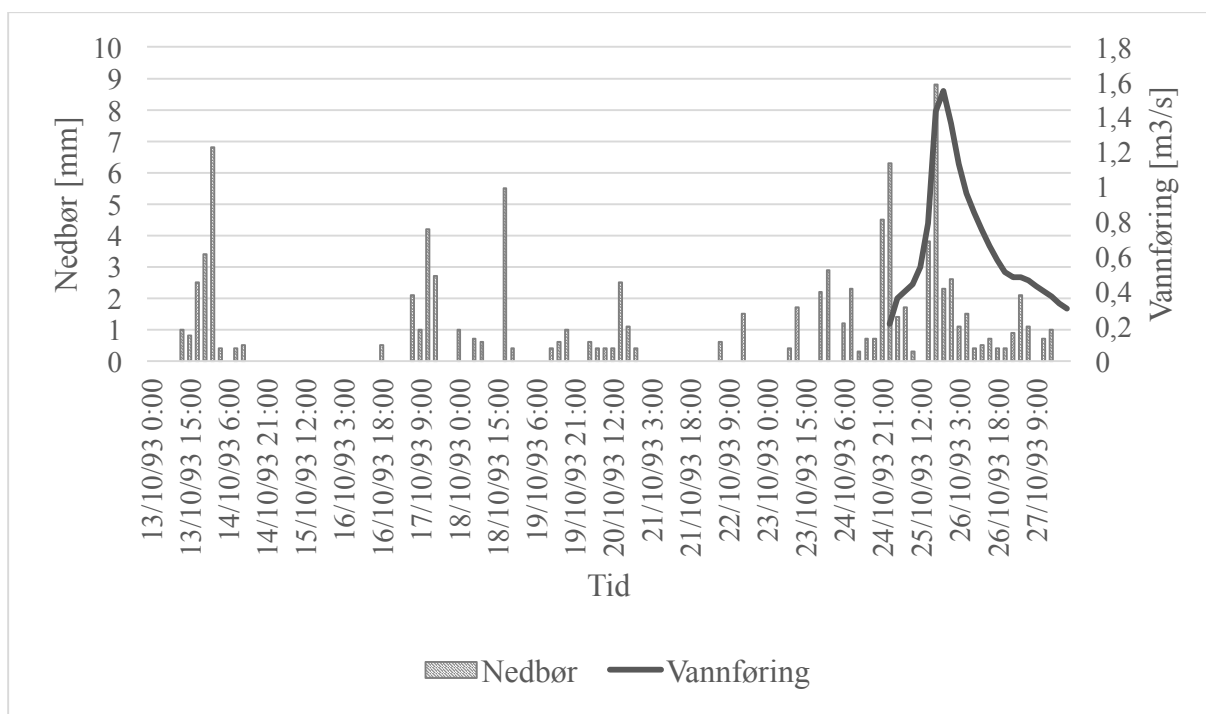
Figur 3.4: Flomhendelse 1988



Figur 3.5: Flomhendelse 1989



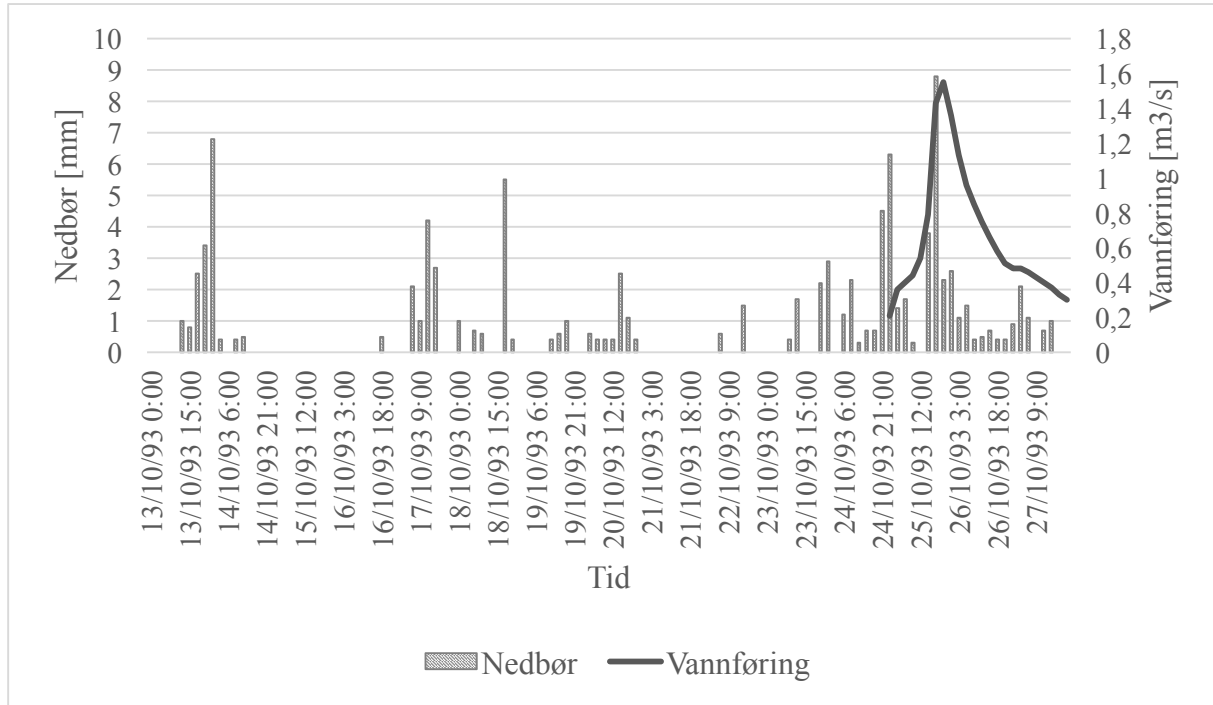
Figur 3.6: Flomhendelse 1990



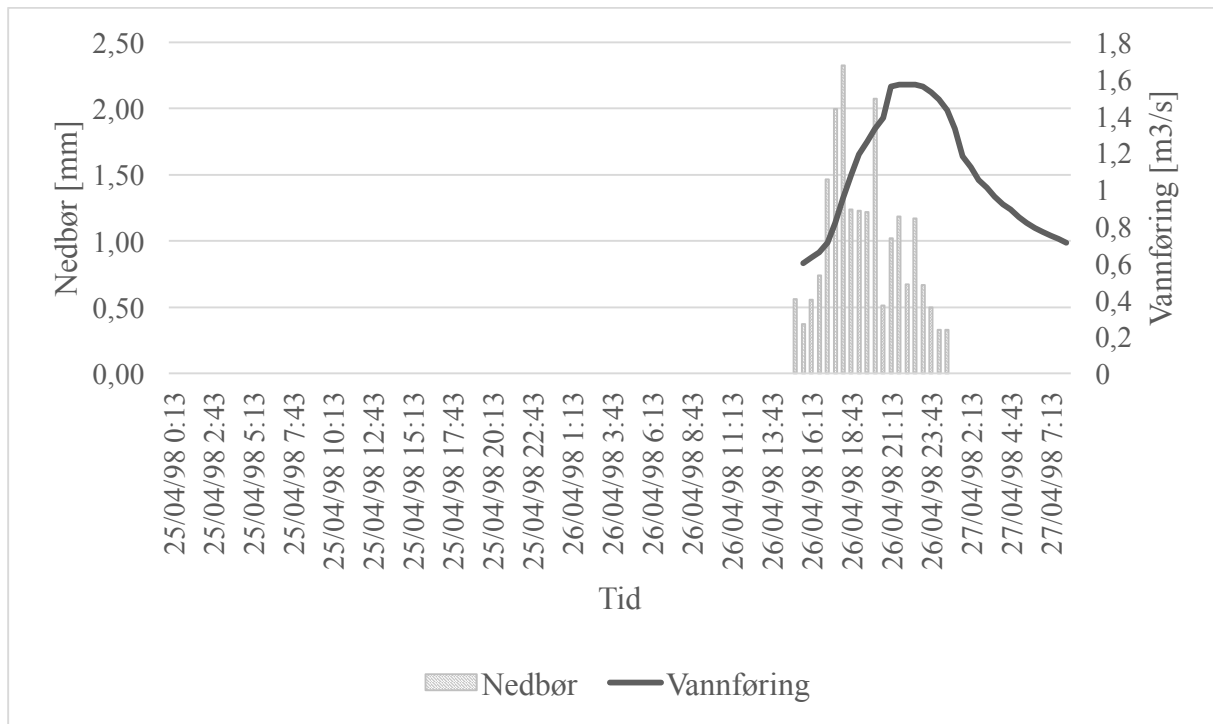
Figur 3.7: Flomhendelse 1993



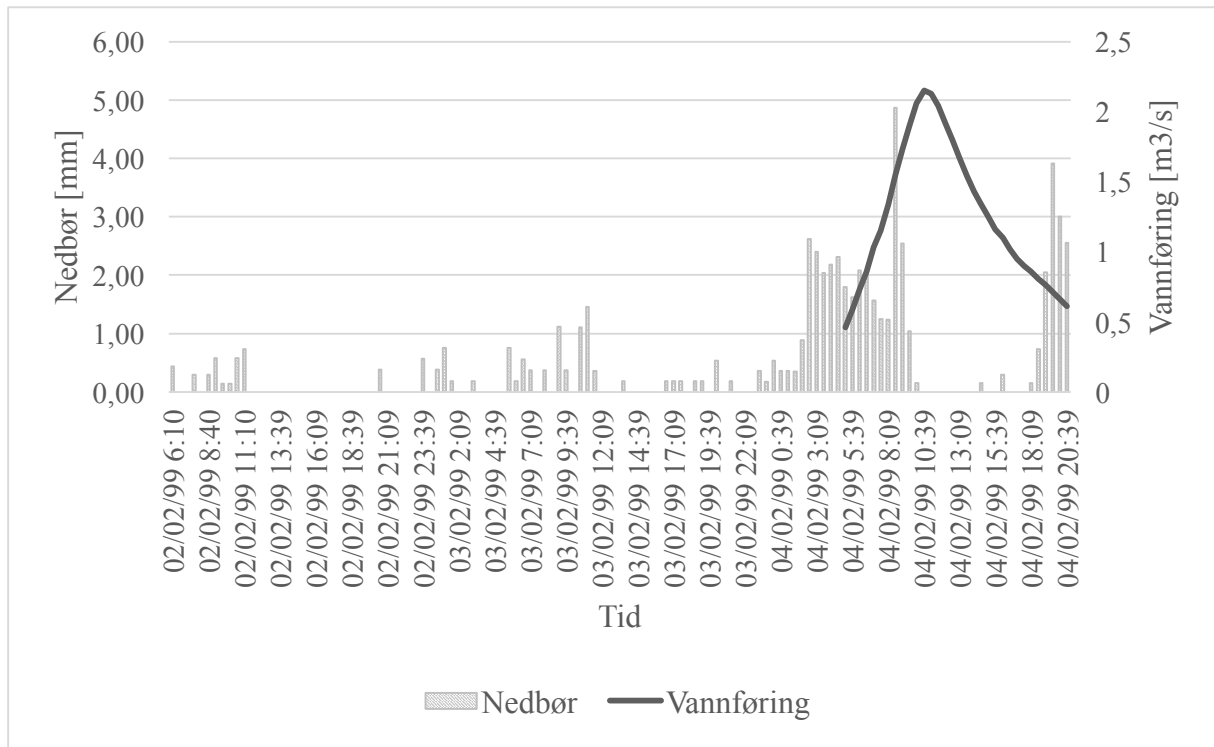
## Vedlegg 4: Grafisk framstilling av flomhendelser med 30-minutters tidsintervall



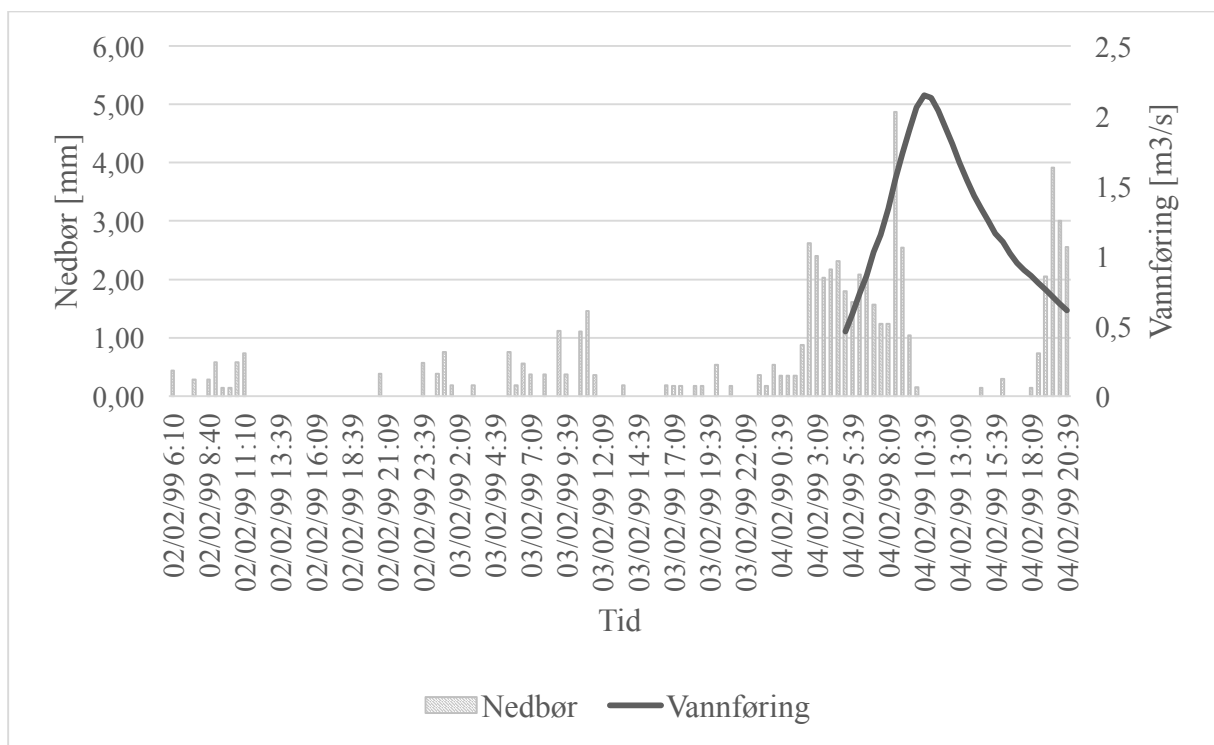
Figur 4.1: Flomhendelse, februar 1998



Figur 4.2: Flomhendelse, april 1998



Figur 4.3: Flomhendelse, februar 1999



Figur 4.4: Flomhendelse, juli 1999

## Vedlegg 5: Døgnmiddeltemperaturer for utvalgte flomhendelser

Dato	Gjennomsnittlig døgnntemperatur ved utvalgte flomhendelser [°C]								
	Dag 1	Dag 2	Dag 3	Dag 4	Dag 5	Dag 6	Dag 7	Dag 8	Dag 9
Oktober 1983	0,3	4,6	9,5	10,7	10,6	7,3	2,9	5,0	6,1
September 1984	4,5	6,7	10,9	10,1	10,2	6,6	4,2	4,9	4,8
Oktober 1985	5,4	1,5	6,0	0,4	3,2	2,6	6,9	1,8	-0,3
Desember 1987	1,8	0,6	0,1	-5,8	-12,4	-4,5	0,5	1,4	-2,1
November 1988	-4,4	-4,4	-5,2	-4,0	-0,4	1,6	3,2	1,5	-3,6
Juli/August 1989	17	20,1	14,9	11,7	13,2	11,8	9,4	9,6	10,5
Mars/April 1990	2,5	2,2	3,6	0,4	2,1	1,3	2,3	0,2	-1,9
Oktober 1993	5,8	2,5	-3,6	-2,7	2,1	2,5	4,9	7,7	7,1
September 1997	17,1	18,7	15,1	17,3	12,7	12,1	10,3	8	7,7
Februar 1998	-0,4	-1,9	3,5	2,8	0,7	2,5	7,5	4,9	5,3
April 1998	4,1	3,6	5	7,7	10,2	9,8	9	7,6	6,2
Februar 1999	-16,2	-12,6	-5,7	-0,6	6,2	5,7	4	1,9	2,4
Juli 1999	17,9	13	12,6	13	15,2	16,9	18,9	18,1	12,1

## Vedlegg 6: Årlig maksimal vannføring for Svarttjønnbekken

Tabell 6.1: Årsmaks for 3-timers flomdata

År	Årlig maks vannføring, Q [m <sup>3</sup> /s]
1973	1,97
1974	1,12
1975	1,76
1976	1,81
1977	1,37
1978	1,55
1979	1,10
1980	0,82
1981	2,18
1982	1,60
1983	2,85
1984	2,20
1985	1,53
1986	1,40
1987	2,22
1988	2,07
1989	1,75
1990	2,11
1991	0,85
1992	2,28
1993	1,55
1994	1,29
1995	0,81
1996	1,73
1997	2,32
1998	1,95
1999	1,95
2000	1,22
2001	1,48

2002	0,83
2003	1,52
2004	2,73
2005	0,98
2006	2,89
2007	1,71
2008	0,84
2009	1,83
2010	1,49
2011	1,31

Tabell 6.2: Årsmaks for 30-minutters flomdata

År	Årlig maks vannføring, Q [m <sup>3</sup> /s]
1995	1,41
1996	0,84
1997	1,78
1998	2,39
1999	2,15
2000	1,26
2001	1,57
2002	0,93
2003	1,56
2004	3,06
2005	1,01
2006	3,00
2007	1,83
2008	0,86
2009	2,08
2010	1,65
2011	1,54
2012	2,92
2013	1,09
2014	0,96
2015	2,72

## Vedlegg 7: Årlig maksimal nedbør for Svarttjønnbekken

Tabell 7.1: Årsmaks for 3-timers nedbørdata

År	Årlig maks nedbør [mm]
1969	13,2
1970	16,4
1971	12,9
1972	14,3
1973	23,0
1974	15,7
1975	22,0
1976	16,0
1977	16,7
1978	13,2
1979	12,8
1980	14,1
1981	11,8
1982	31,5
1983	34,0
1984	24,8
1985	15,0
1986	15,1
1987	13,8
1988	15,3
1989	18,7
1990	22,1
1991	11,7
1992	33,1
1993	29,3
1994	15,3

Tabell 7.2: Årsmaks for 30-minutters nedbørdata

År	Årlig maks nedbør [mm]
1990	13,4
1991	4,6
1992	4,5
1993	18,6
1994	7,0
1995	13,2
1996	9,3
1997	17,5
1998	8,6
1999	11,7
2000	5,2
2001	9,4
2002	6,5
2003	8,5
2004	14,4
2005	3,7



## Vedlegg 8: R-kode brukt ved flomfrekvensanalyse

```
# Utrekning av flomverdiar med ulike gjentaksintervall.
# Basert p?? lmomco biblioteket av W.H.Asquith
#
library(lmomco)

d<-read.table("hoggas.txt", header=TRUE)

# Gjentaksintervall
gint <- c(2,5,10,20,50,100,200,500,1000, 10000)
fv <- c(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

# Find L-moments from inout
lmom<-lmoms(d$Qmaks)

# Fordelingar
ford <- c("gev", "gno", "pe3", "ln3", "gum")
txt <- c("Generalized extreme value", "Generalized
Normal", "Pearson3", "Log-Normal3", "Gumbel")

# Plot oversikt over data
barplot(d$Qmaks, names=d$Aar, ylab="Qmaks")

#
# Finner sannsyn for ikkje å overskride T
# Reknar flom med ulike gjentaksintervall
#

for (j in 1:length(ford)) {
  for (i in 1:length(gint)) {
    non = T2prob(gint[i]) #1 - (1/gint[i])
    fv[i] <- qlmomco(non, lmom2par(lmom, type=ford[j]))
    us <- paste(txt[j], "T=", gint[i], " : ", fv[i])
    print(us)
  }
}
```

```
x=seq(0,400,length.out=40)
hist(d$Qmaks,prob=TRUE)
#fdist <- dnorm(x, mean=mean(d$Qmaks), sd=sd(d$Qmaks))
curve(dnorm(x, mean=mean(d$Qmaks), sd=sd(d$Qmaks)), add=TRUE, col =
"red")
```

## Vedlegg 9: Flomfrekvensanalyse for vannføring

Tabell 9.1: Resultat fra flomfrekvensanalyse for 3-timers data.

<b>Gjentaks- intervall, T</b>	<b>Gumbel- fordeling (GUM)</b>	<b>Generalisert ekstremverdi fordeling (GEV)</b>	<b>Generalisert logistisk fordeling (GLO)</b>	<b>Pearson Type III fordeling (PE3)</b>	<b>Generalisert normal- fordeling (GNO)</b>	<b>Normal- fordeling (Bane NOR)</b>
1,00	0,60	0,40	0,17	0,40	0,38	0,15
1,01	0,68	0,52	0,38	0,52	0,51	0,33
1,02	0,76	0,63	0,54	0,62	0,62	0,49
1,04	0,85	0,75	0,72	0,75	0,75	0,66
1,05	0,88	0,80	0,78	0,79	0,79	0,72
1,11	1,00	0,96	0,97	0,96	0,96	0,93
1,18	1,09	1,07	1,10	1,07	1,07	1,07
1,25	1,17	1,17	1,20	1,17	1,17	1,18
1,33	1,24	1,25	1,28	1,25	1,25	1,27
1,43	1,30	1,33	1,36	1,33	1,33	1,36
1,54	1,37	1,40	1,43	1,40	1,40	1,44
1,67	1,43	1,47	1,49	1,47	1,48	1,51
1,82	1,50	1,54	1,56	1,55	1,55	1,59
2,00	1,56	1,61	1,62	1,62	1,62	1,66
2,22	1,63	1,69	1,68	1,69	1,69	1,73
2,50	1,70	1,76	1,75	1,76	1,76	1,80
2,86	1,78	1,84	1,82	1,84	1,84	1,88
3,33	1,87	1,93	1,90	1,93	1,92	1,96
4,00	1,97	2,02	1,98	2,02	2,02	2,04
5,00	2,09	2,13	2,08	2,12	2,12	2,14
6,67	2,23	2,26	2,21	2,25	2,25	2,25
10,00	2,43	2,42	2,38	2,41	2,41	2,39
20,00	2,77	2,67	2,67	2,67	2,67	2,59
25,00	2,87	2,75	2,76	2,74	2,75	2,66
50,00	3,20	2,96	3,05	2,97	2,97	2,83
100,00	3,52	3,15	3,36	3,18	3,19	2,98

Tabell 9.2: Resultat fra flomfrekvensanalyse for 30-minutters data.

<b>Gjentaks- intervall, T</b>	<b>Gumbel- fordeling (GUM)</b>	<b>Generalisert ekstremverdi fordeling (GEV)</b>	<b>Generalisert logistisk fordeling (GLO)</b>	<b>Pearson Type III fordeling (PE3)</b>	<b>Generalisert normal- fordeling(GNO)</b>	<b>Normal- fordeling (Bane NOR)</b>
1,00	0,15	-0,10	-0,40	-0,08	-0,11	-0,49
1,01	0,27	0,07	-0,12	0,07	0,06	-0,23
1,02	0,38	0,22	0,10	0,22	0,21	0,00
1,04	0,51	0,39	0,34	0,39	0,38	0,24
1,05	0,56	0,45	0,42	0,45	0,45	0,33
1,11	0,73	0,67	0,69	0,67	0,67	0,62
1,18	0,86	0,83	0,87	0,83	0,83	0,82
1,25	0,97	0,96	1,01	0,96	0,97	0,98
1,33	1,07	1,08	1,13	1,08	1,08	1,12
1,43	1,16	1,19	1,23	1,19	1,19	1,24
1,54	1,25	1,29	1,33	1,29	1,30	1,35
1,67	1,34	1,39	1,42	1,40	1,40	1,46
1,82	1,43	1,49	1,51	1,50	1,50	1,56
2,00	1,53	1,59	1,60	1,60	1,60	1,67
2,22	1,63	1,70	1,69	1,70	1,70	1,77
2,50	1,73	1,80	1,79	1,81	1,80	1,87
2,86	1,84	1,92	1,89	1,92	1,92	1,98
3,33	1,97	2,04	2,00	2,04	2,04	2,09
4,00	2,11	2,18	2,13	2,18	2,17	2,22
5,00	2,28	2,33	2,27	2,33	2,32	2,35
6,67	2,49	2,52	2,45	2,51	2,51	2,51
10,00	2,78	2,76	2,70	2,75	2,75	2,71
20,00	3,25	3,14	3,12	3,13	3,13	3,01
25,00	3,40	3,25	3,26	3,24	3,24	3,09
50,00	3,87	3,57	3,70	3,57	3,58	3,34
100,00	4,33	3,86	4,15	3,88	3,90	3,56

## Vedlegg 10: Flomfrekvensanalyse for nedbør

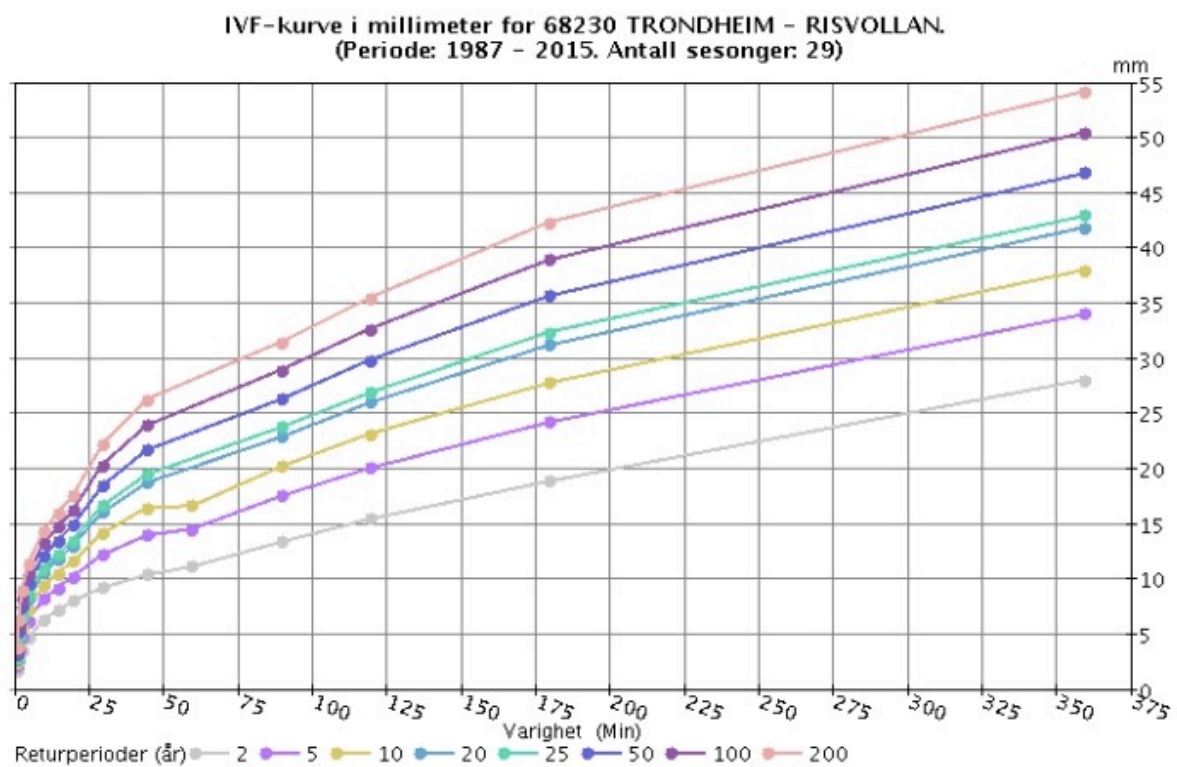
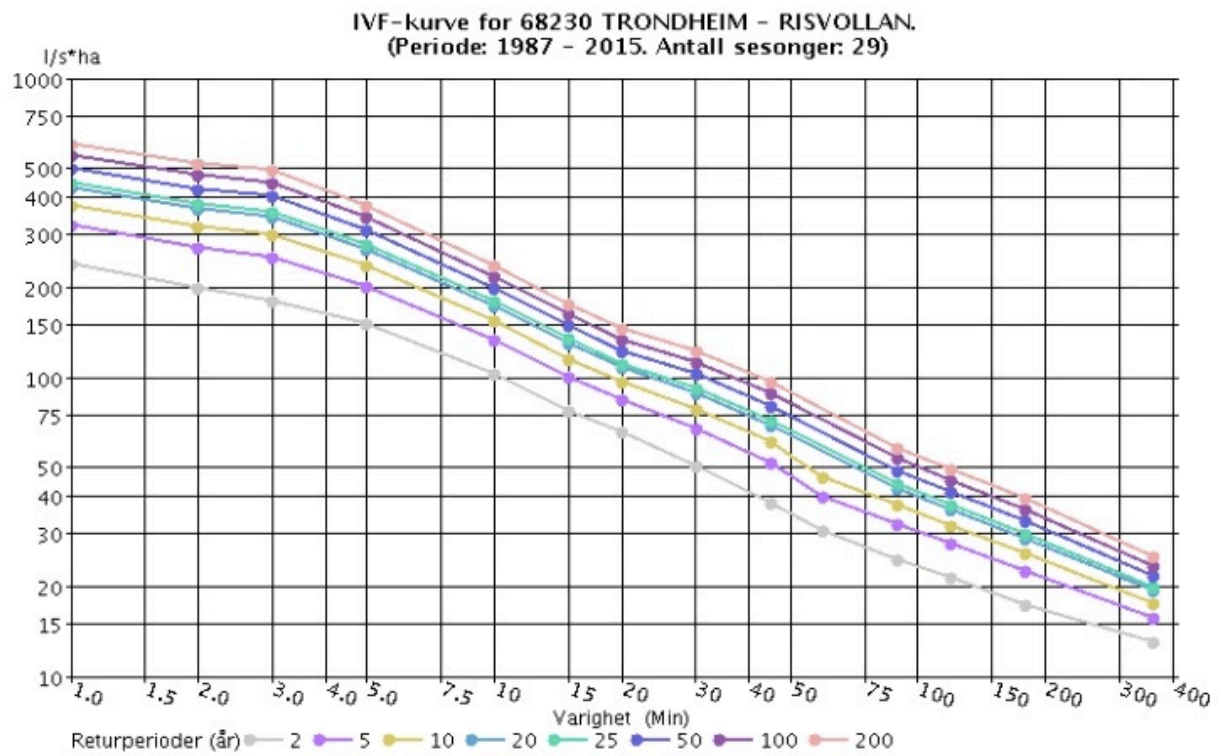
Tabell 10.1: Resultat fra flomfrekvensanalyse for 3-timers data.

<b>Gjentaks- intervall, T</b>	<b>Gumbel- fordeling (GUM)</b>	<b>Generalisert ekstremverdi fordeling (GEV)</b>	<b>Generalisert logistisk fordeling (GLO)</b>	<b>Pearson Type III fordeling (PE3)</b>	<b>Generalisert normal- fordeling(GNO)</b>	<b>Normal- fordeling (Bane NOR)</b>
1,00	6,0	9,6	9,4	11,7	10,4	0,1
1,01	6,6	9,9	9,6	11,7	10,6	1,5
1,02	7,5	10,3	10,0	11,8	10,8	3,6
1,04	8,4	10,7	10,5	11,8	11,1	5,4
1,05	9,4	11,2	11,0	11,9	11,4	7,3
1,11	9,8	11,4	11,3	12,0	11,6	8,0
1,18	11,2	12,2	12,1	12,2	12,2	10,3
1,25	12,2	12,8	12,8	12,6	12,7	11,9
1,33	13,0	13,3	13,4	13,0	13,2	13,1
1,43	13,8	13,8	13,9	13,4	13,7	14,2
1,54	14,5	14,3	14,4	13,8	14,1	15,2
1,67	15,3	14,8	14,9	14,3	14,6	16,1
1,82	16,0	15,3	15,4	14,9	15,1	16,9
2,00	16,7	15,8	16,0	15,5	15,7	17,7
2,22	17,4	16,4	16,5	16,1	16,3	18,5
2,50	18,2	17,0	17,1	16,9	17,0	19,3
2,86	19,0	17,7	17,8	17,7	17,7	20,2
3,33	19,9	18,5	18,5	18,7	18,6	21,0
4,00	20,9	19,4	19,4	19,8	19,5	21,9
5,00	22,0	20,5	20,4	21,2	20,7	22,9
6,67	23,3	21,9	21,7	22,8	22,2	23,9
10,00	25,0	23,8	23,5	25,0	24,2	25,2
20,00	27,3	26,7	26,2	28,0	27,2	26,7
25,00	31,0	32,2	31,7	33,3	32,8	29,1
50,00	32,2	34,2	33,7	35,0	34,8	29,8
100,00	35,9	41,3	41,1	40,4	41,3	31,7

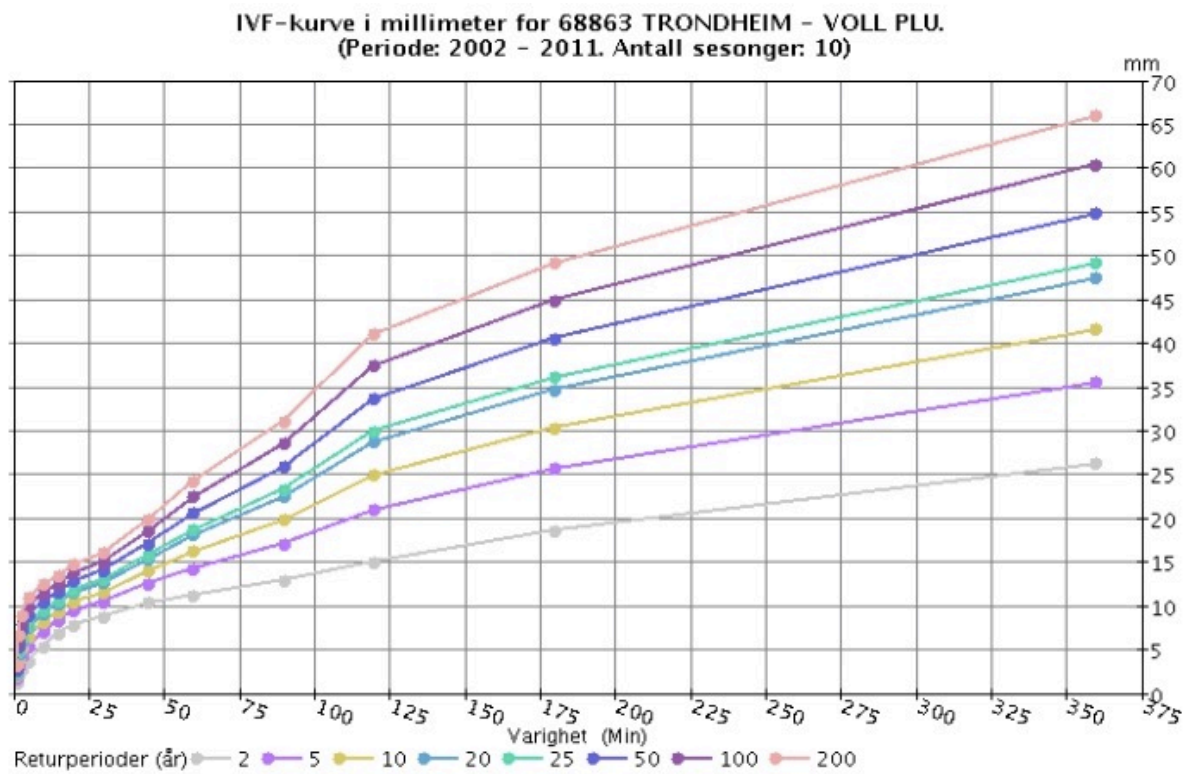
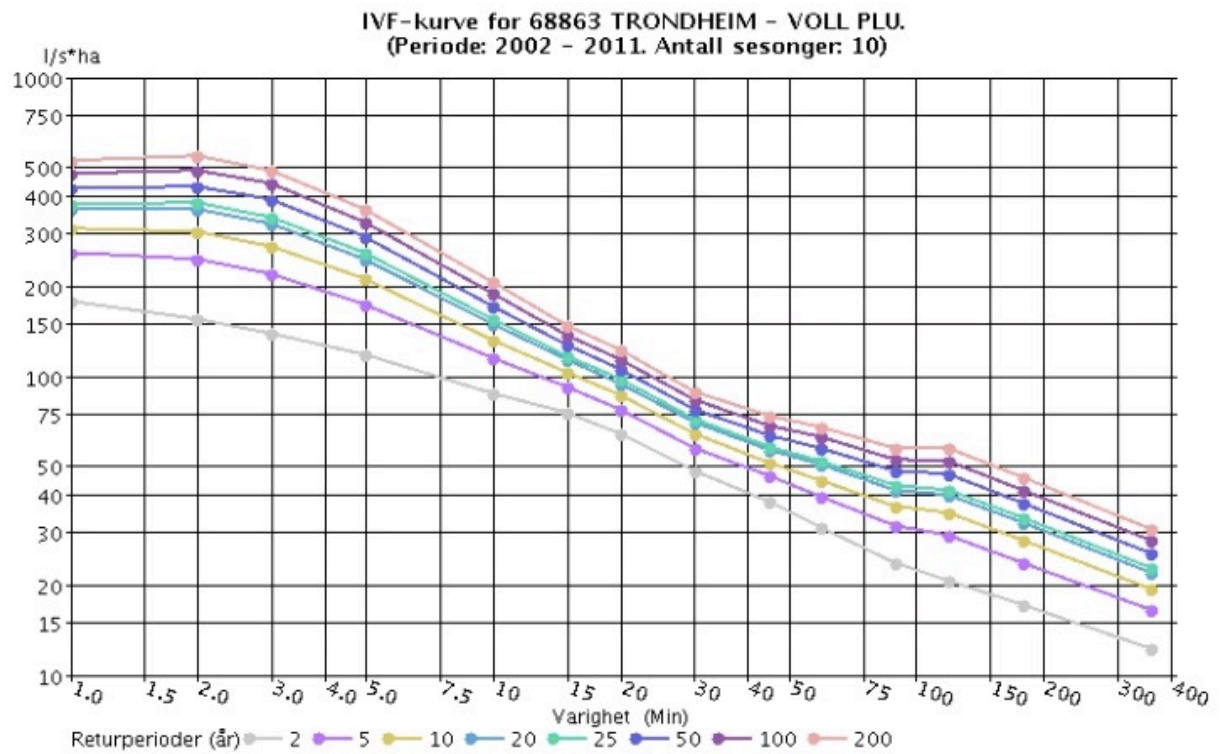
Tabell 10.2: Resultat fra flomfrekvensanalyse for 30-minutters data.

<b>Gjentaks- intervall, T</b>	<b>Gumbel- fordeling (GUM)</b>	<b>Generalisert ekstremverdi fordeling (GEV)</b>	<b>Generalisert logistisk fordeling (GLO)</b>	<b>Pearson Type III fordeling (PE3)</b>	<b>Generalisert normal- fordeling(GNO)</b>	<b>Normal- fordeling (Bane NOR)</b>
1,00	0,4	-0,1	-1,5	0,7	0,2	-4,0
1,01	0,9	0,5	-0,7	1,0	0,6	-2,9
1,02	1,6	1,2	0,4	1,6	1,3	-1,4
1,04	2,2	1,9	1,4	2,1	2,0	1,4
1,05	3,0	2,8	2,5	2,8	2,8	1,9
1,11	3,2	3,1	2,9	3,1	3,1	3,6
1,18	4,3	4,2	4,2	4,1	4,9	4,8
1,25	5,0	5,0	5,1	4,9	5,6	5,7
1,33	5,7	5,6	5,8	5,6	6,2	6,5
1,43	6,2	6,3	6,5	6,2	6,8	7,2
1,54	6,8	6,8	7,0	6,8	7,4	7,9
1,67	7,3	7,4	7,6	7,3	7,9	8,5
1,82	7,8	7,9	8,1	7,9	8,5	9,2
2,00	8,4	8,5	8,6	8,5	9,0	9,8
2,22	8,9	9,0	9,1	9,0	9,6	10,4
2,50	9,5	9,6	9,6	9,6	10,3	11,0
2,86	10,1	10,2	10,2	10,3	10,9	11,6
3,33	10,8	10,9	10,8	11,0	11,7	12,3
4,00	11,5	11,6	11,5	11,7	12,5	13,0
5,00	12,4	12,5	12,2	12,6	13,5	13,8
6,67	13,3	13,4	13,1	13,5	14,7	14,7
10,00	14,6	14,6	14,3	14,7	16,3	15,9
20,00	16,3	16,3	15,9	16,3	18,9	17,6
25,00	19,1	18,9	18,7	18,9	19,7	18,1
50,00	20,0	19,7	19,7	19,6	22,1	19,6
100,00	22,7	22,2	22,8	22,0	24,6	20,9

# Vedlegg 11: IVF-kurve for Risvollan, Trondheim

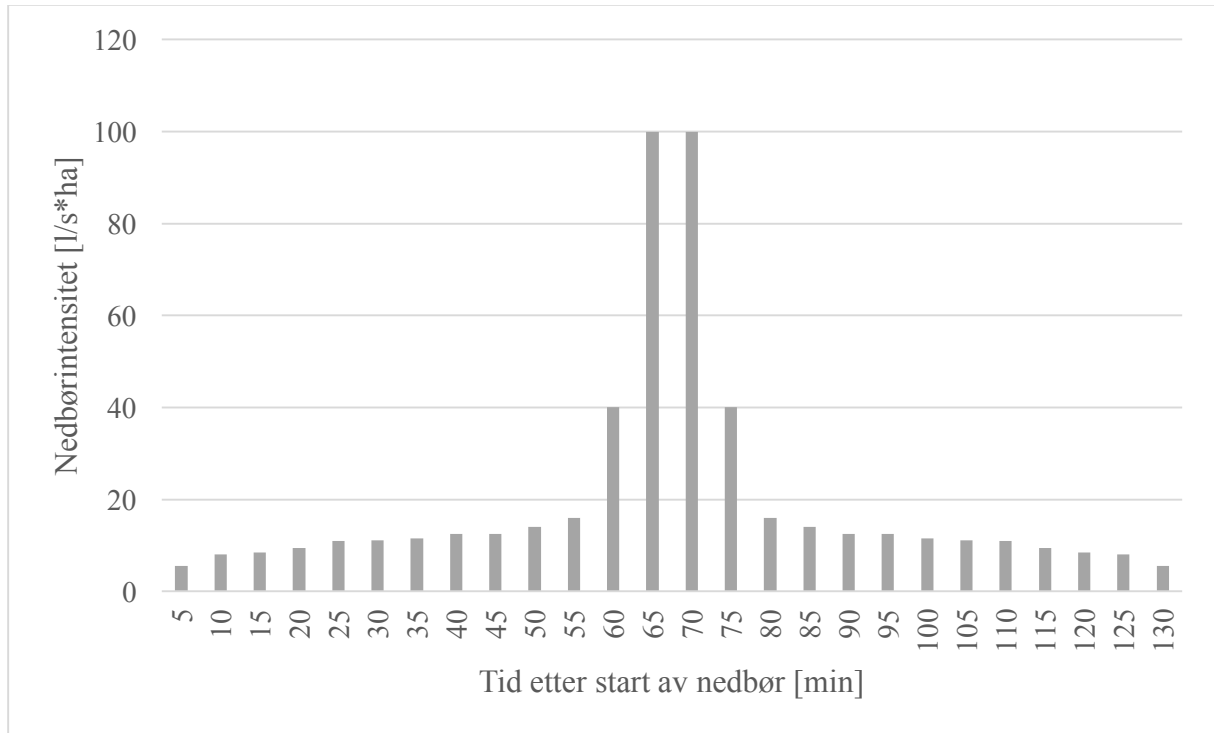


## Vedlegg 12: IVF-kurve for Voll, Trondheim

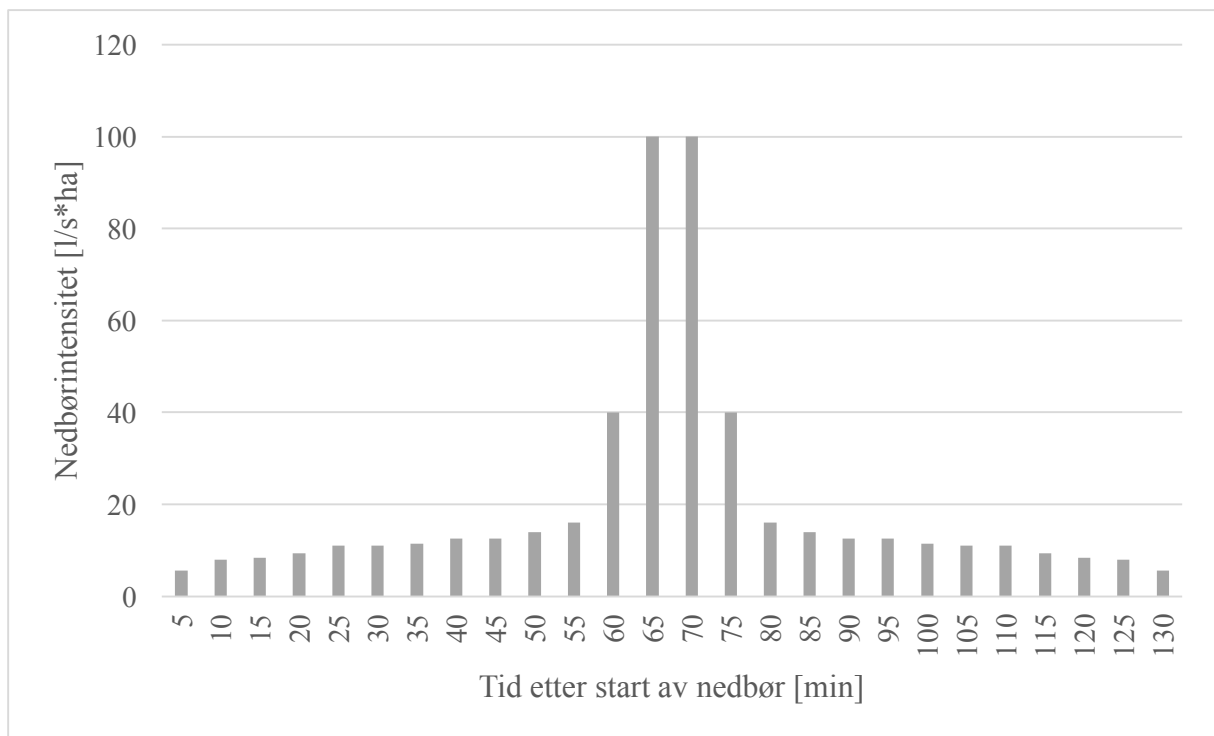




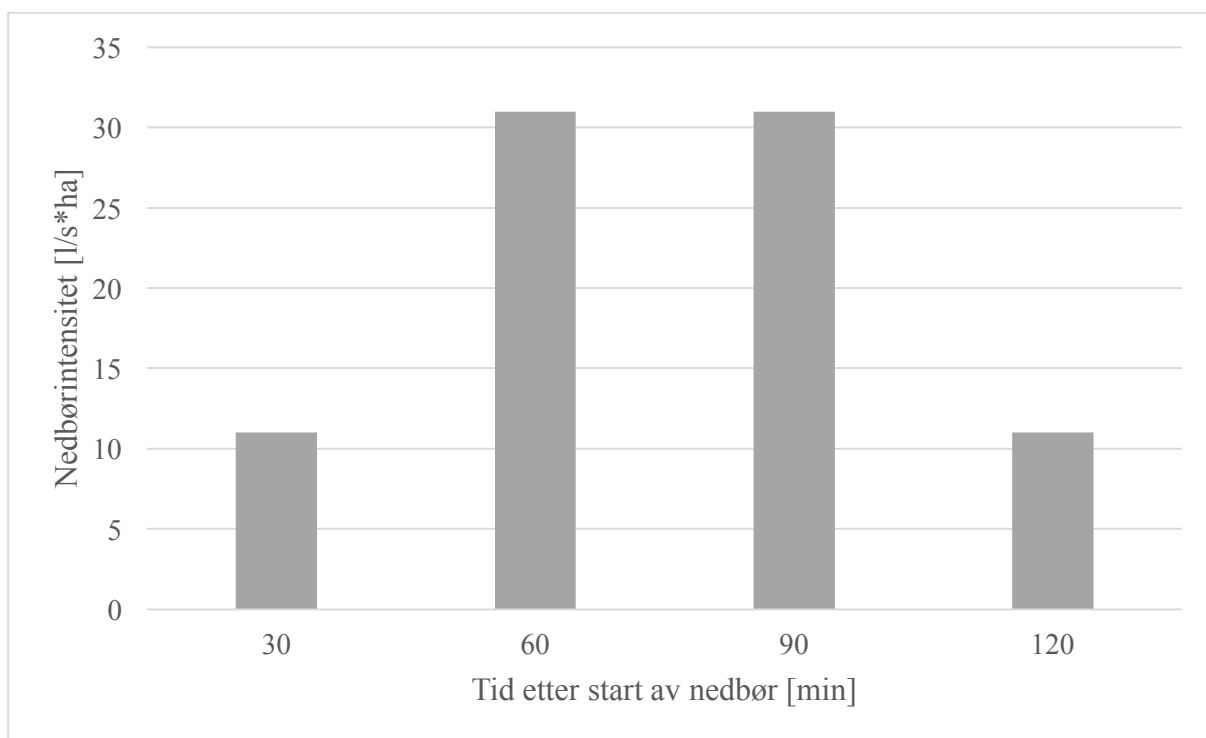
## Vedlegg 13: Design hyetogram for Voll



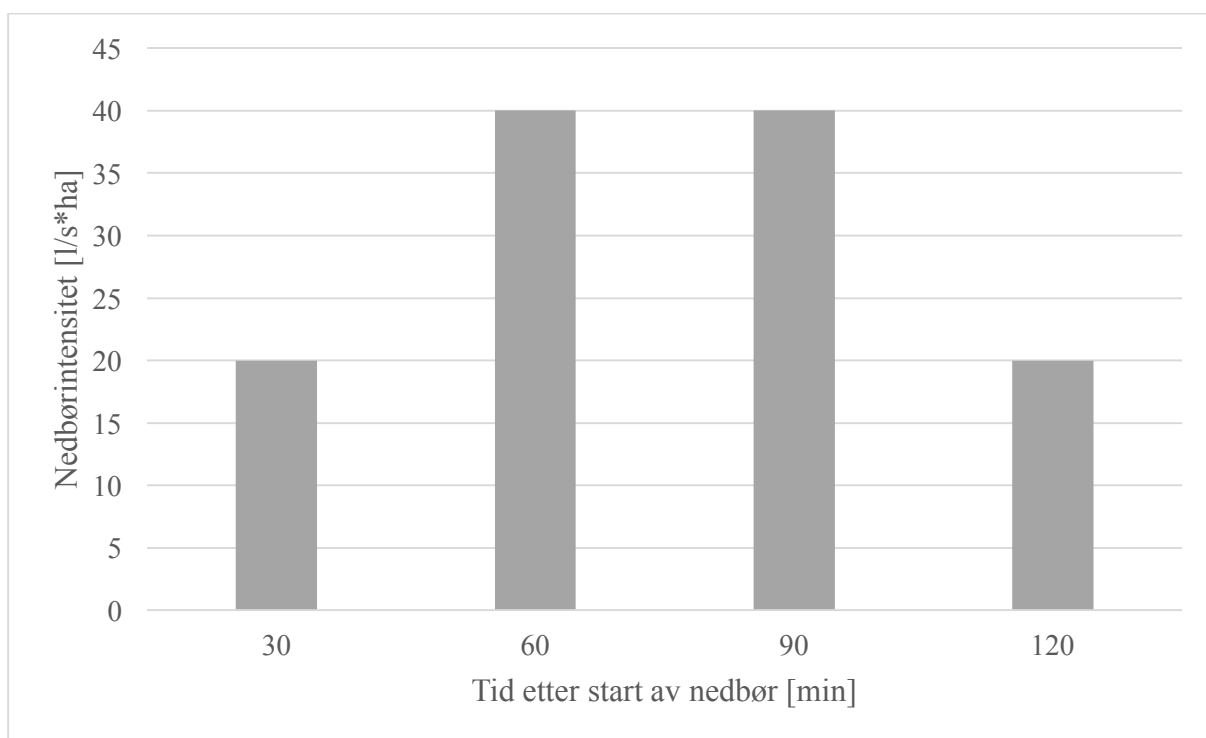
Figur 13.1: Design hyetogram med 2 års gjentakintervall og beregningssteg på 5 minutt.



Figur 13.2: Design hyetogram med 5 års gjentakintervall og beregningssteg på 5 minutt.

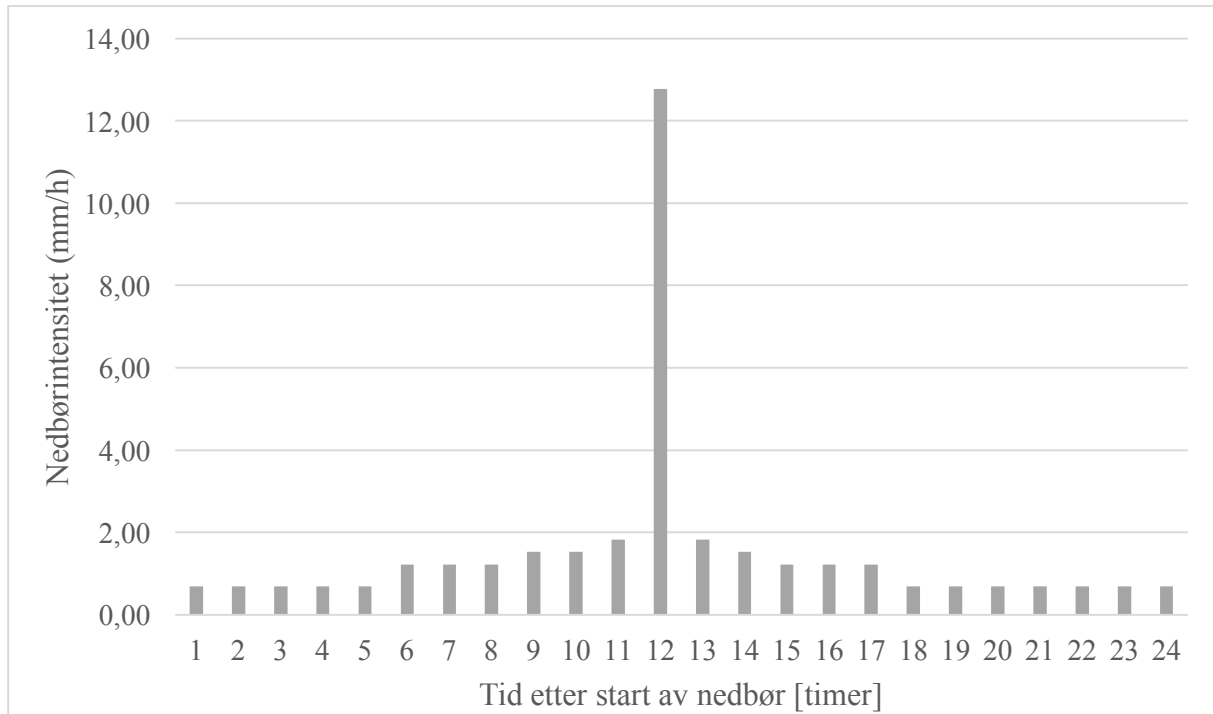


Figur 13.3: Design hyetogram med 2 års gjentaksintervall og beregningssteg på 30 minutt.

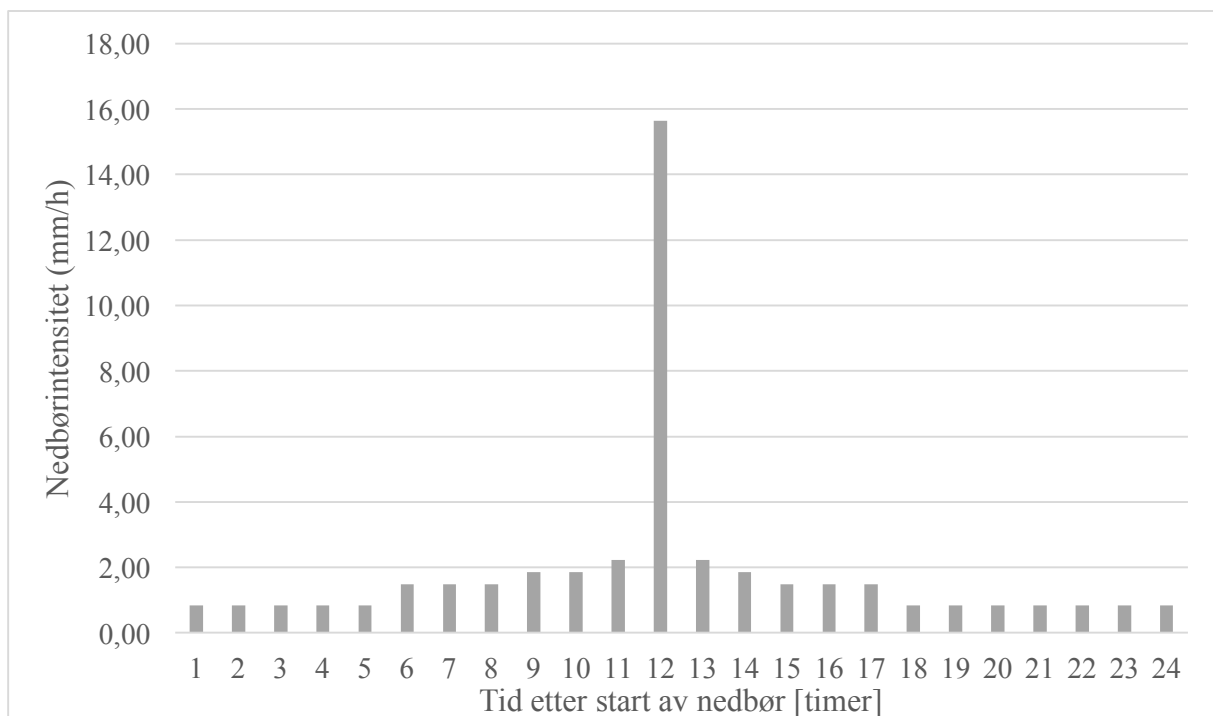


Figur 13.4: Design hyetogram med 5 års gjentaksintervall og beregningssteg på 30 minutt.

## Vedlegg 14: Design hyetogram for Svarttjønnbekken basert på ekstremnedbør

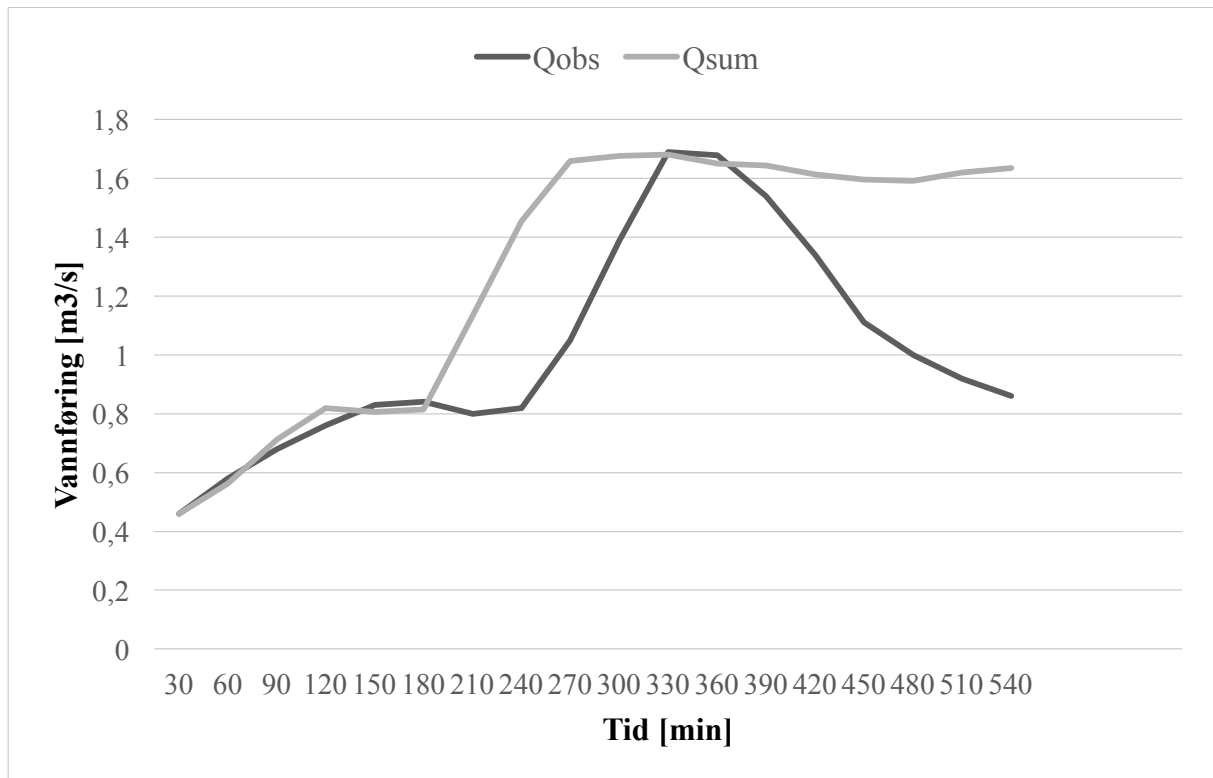


Figur 14.1: Design hyetogram med 2 års gjentakingsintervall.

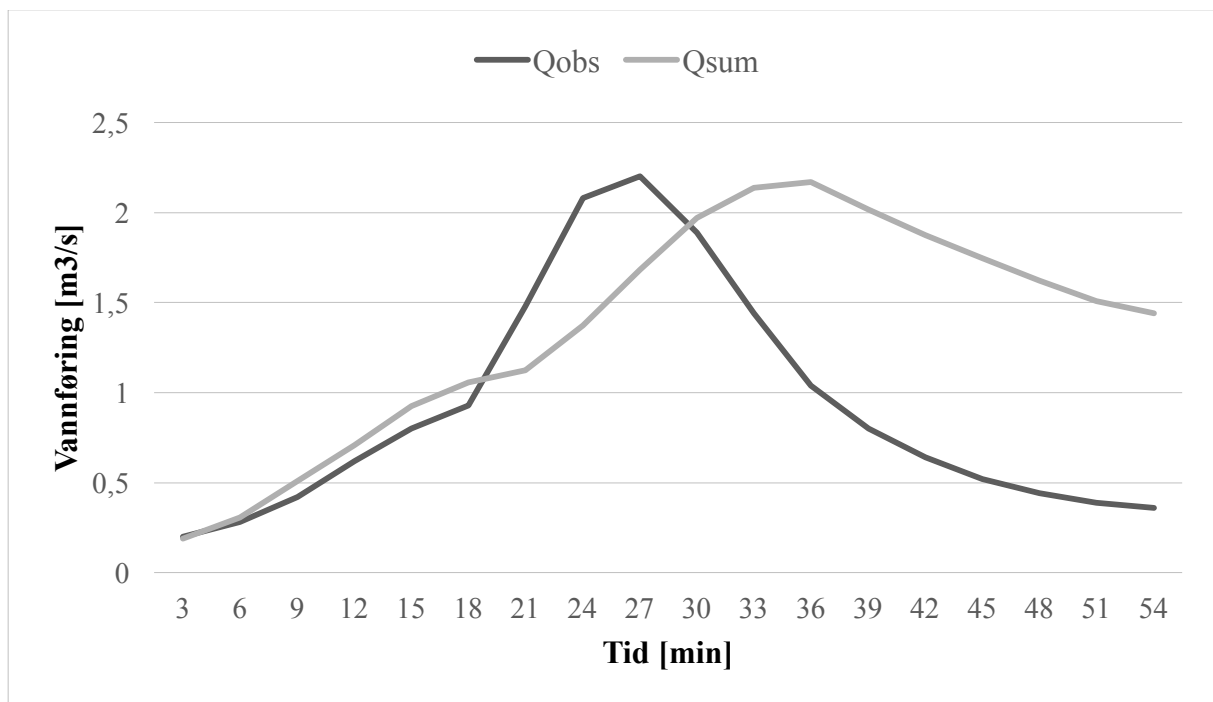


Figur 14.2: Design hyetogram med 5 års gjentakingsintervall.

## Vedlegg 15: Hydrogram for kalibrering ved PQRUT

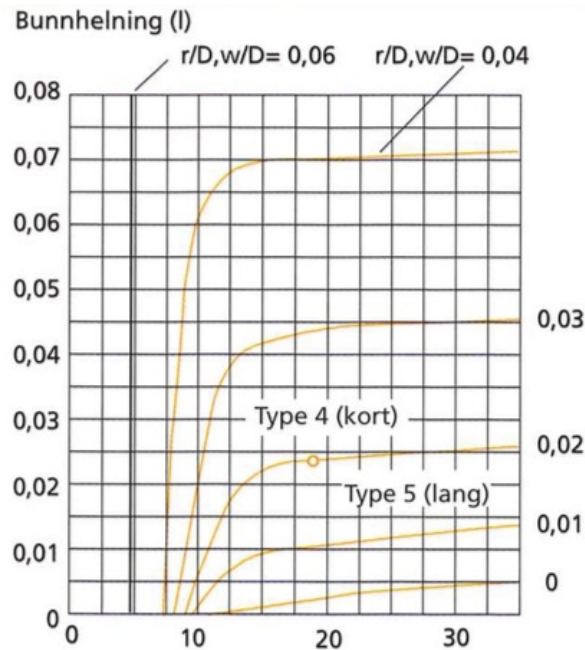


Figur 15.1: Hydrogram for hendelse fra september 1997.



Figur 15.2: Hydrogram for hendelse fra september 1984.

## Vedlegg 16: Oppslagsverk for stikkrennekapasitetsberegning



Figur 16.1: Grense mellom hydraulisk kort og lang kulvert av betong.

Tabell 16.1: Bestemmelse av vannføringskoeffisient  $C_D$ .

10.10). (Etter U.S. Bureau of Reclamation)

$y_1/D$	$r/b, w/b, r/D$ or $w/D$						
	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,14
1,4	0,44	0,46	0,49	0,5	0,50	0,51	0,51
1,5	0,46	0,49	0,52	0,53	0,53	0,54	0,54
1,6	0,47	0,51	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56
1,7	0,48	0,52	0,55	0,57	0,57	0,57	0,57
1,8	0,49	0,54	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58
1,9	0,50	0,55	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60
2,0	0,51	0,56	0,59	0,60	0,61	0,61	0,62
2,5	0,54	0,59	0,62	0,64	0,64	0,65	0,66
3,0	0,55	0,61	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
3,5	0,57	0,62	0,65	0,67	0,69	0,70	0,71
4,0	0,58	0,63	0,66	0,68	0,70	0,71	0,72
5,0	0,59	0,64	0,67	0,69	0,71	0,728	0,73

## Vedlegg 17: Stikkrennekapasitetsberegninger ved varierende vannstand

Tabell 17.1: Beregninger for stikkrenne med tverrsnitt 600x600 mm.

Relativ vannstand, $y1/D$	Vannføring ved frispeilstrømning [m <sup>3</sup> /s]	Vannføring ved dykket innløp [m <sup>3</sup> /s]	Vannføring over kulvert [m <sup>3</sup> /s]	Kapasitet av kulverten [m <sup>3</sup> /s]
0,00	0,00			0,00
0,20	0,10			0,06
0,40	0,27			0,18
0,60	0,50			0,33
0,80	0,77			0,51
1,00	1,07			0,71
1,20	1,17			0,78
1,40		0,72		0,72
1,60		0,84		0,84
1,80		0,94		0,94
2,00		1,03	0,11	1,14
2,20		1,10	0,19	1,29
2,40		1,19	0,30	1,49
2,60		1,23	0,45	1,69
2,80		1,30	0,64	1,94
3,00		1,37	0,88	2,25
3,20		1,41	1,17	2,59
3,40		1,48	1,52	3,00
3,60		1,52	1,94	3,46
3,80		1,59	2,42	4,01
4,00		1,63	2,97	4,60
4,20		1,67	3,61	5,28
4,40		1,71	4,33	6,04
4,60		1,77	5,14	6,91
4,80		1,81	6,04	7,86
5,00		1,85	7,05	8,90

Tabell 17.2: Beregninger for stikkrenne med tverrsnitt 1000x1000 mm.

<b>Relativ vannstand, y1/D</b>	<b>Vannføring ved friskeilstrømning [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Vannføring ved dykket innløp [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Vannføring over kulvert [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Kapasitet av kulverten [m<sup>3</sup>/s]</b>
0,00	0,00			0,00
0,20	0,34			0,34
0,40	0,97			0,97
0,60	1,78			1,78
0,80	2,74			2,74
1,00	3,84			3,84
1,20	4,20			4,20
1,40		2,62		2,62
1,60		3,08		3,08
1,80		3,45		3,45
2,00		3,76	0,85	4,61
2,20		4,07	1,47	5,54
2,40		4,39	2,33	6,72
2,60		4,57	3,48	8,05
2,80		4,82	4,96	9,77
3,00		5,06	6,80	11,87
3,20		5,23	9,05	14,28
3,40		5,47	11,75	17,22
3,60		5,63	14,94	20,57
3,80		5,87	18,66	24,53
4,00		6,02	22,95	28,97
4,20		6,17	27,85	34,03
4,40		6,32	33,41	39,73
4,60		6,56	39,66	46,21
4,80		6,70	46,64	53,34
5,00		6,83	54,40	61,23

## Vedlegg 18: Stikkrennekapasitetsberegninger ved varierende tverrsnittareal.

Tabell 18.1: Kapasitet ved frispeilstømning.

Areal	Kapasitet [m <sup>3</sup> /s]
0	0,00
0,1	0,34
0,2	0,69
0,3	1,03
0,4	1,37
0,5	1,72
0,6	2,06
0,7	2,40
0,8	2,74

Tabell 18.2: Kapasitet ved dykket innløp.

Areal	y1/D	C <sub>D</sub>	Kapasitet [m <sup>3</sup> /s]
0	3,2	0,65	0,00
0,1	2,9	0,64	0,36
0,2	2,7	0,63	0,71
0,3	2,5	0,62	1,04
0,4	2,3	0,61	1,37
0,5	2,1	0,60	1,68
0,6	2,0	0,59	1,98
0,7	1,9	0,58	2,27
0,8	1,8	0,57	2,55
0,9	1,7	0,55	2,77
1,0	1,6	0,54	3,03



## Vedlegg 19: Kapasitet og gjentaksintervall ved redusert tverrsnittareal.

Tabell 19.1: Beregninger med utgangspunkt i sirkulært tverrsnitt.

Redusert tverrsnittareal [%]	Vannføring [m <sup>3</sup> /s]	Areal [m <sup>2</sup> ]	Gjentaksintervall [år]
0	3,32	0,85	200,0
5	3,12	0,81	91,3
10	2,91	0,76	44,4
15	2,71	0,72	20,5
20	2,51	0,68	13,8
25	2,32	0,64	7,9
30	2,13	0,59	5,0
35	1,94	0,55	3,4
40	1,75	0,51	2,5
45	1,57	0,47	1,9
50	1,40	0,42	1,5
55	1,22	0,38	1,3
60	1,06	0,34	1,2
65	0,89	0,30	1,1
70	0,74	0,25	1,0
75	0,59	0,21	1,0
80	0,44	0,17	1,0
85	0,31	0,13	0,7
90	0,19	0,08	0,6
95	0,08	0,04	0,6
100	0,00	0,00	0,0

Tabell 19.2: Beregninger med utgangspunkt i kvadratisk tverrsnitt.

<b>Redusert tverrsnittareal [%]</b>	<b>Vannføring [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Areal [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Gjentaksintervall [år]</b>
<b>0</b>	3,32	0,88	200,0
<b>5</b>	3,08	0,84	82,2
<b>10</b>	2,88	0,80	40,6
<b>15</b>	2,68	0,75	16,9
<b>20</b>	2,49	0,71	12,7
<b>25</b>	2,29	0,66	7,4
<b>30</b>	2,10	0,62	4,8
<b>35</b>	1,92	0,57	3,2
<b>40</b>	1,74	0,53	2,4
<b>45</b>	1,56	0,49	1,9
<b>50</b>	1,38	0,44	1,5
<b>55</b>	1,21	0,40	1,3
<b>60</b>	1,05	0,35	1,2
<b>65</b>	0,88	0,31	1,1
<b>70</b>	0,73	0,27	1,0
<b>75</b>	0,58	0,22	1,0
<b>80</b>	0,44	0,18	1,0
<b>85</b>	0,31	0,13	0,7
<b>90</b>	0,18	0,09	0,6
<b>95</b>	0,08	0,04	0,6
<b>100</b>	0,00	0,00	0,0