

MILJØDIREKTORATET

METODER FOR BEREGNING AV KLIMAFAKTORER FOR FREMTIDIG NEDBØRINTENSITET



Foto: Styrregn i Botanisk hage, Oslo, Tharan Åse Fergus, 2.juni 2013

OPPDAGSNR.

A060729

UTGIVELSESDATO

12.12.2014

OPPRAGSGIVERS KONTAKTPERSON

Maria Malene Kvalevåg

OPPDAGSGIVERS PUBLISERINGSNR.

M-292|2015 Miljødirektoratet

UTARBEIDET/KONTROLLERT

Kim H Paus (COWI), Eirik J Førland (MET), Anne Fleig (NVE), Oddvar Lindholm (NMBU), Svein Ole Åstebøl (COWI)

KONTROLLERT

Svein Ole Åstebøl (COWI)

GODKJENT

Stein B Olsen (COWI)

INNHold

Sammendrag	4
Begrepsavklaring	5
1 Innledning	6
1.1 Bakgrunn og oppgavemål	6
1.2 Avgrensninger	6
1.3 Metode og gjennomføring	7
2 Bakgrunn	8
2.1 Dimensjonerende nedbørintensitet	8
2.2 Klimafaktor	8
3 Metoder for beregning av klimafaktorer	11
3.1 Metode 1: Clausius-Clapeyron-likningen	12
3.2 Metode 2: Empirisk justering	14
3.3 Metode 3: Stokastiske værgeneratorer	14
3.4 Metode 4: Analogt utvalg av historiske data	16
3.5 Metode 5: Analogt klimaområde	16
3.6 Metode 6: Døgnnedbør fra RCM	16
3.7 Metode 7: Direkte fra RCM	17
4 Vurderingskriterier	18
5 Diskusjon	19
6 Anbefalinger og forslag til videre arbeid	20
7 Referanser	21
Vedlegg 1 Metoder for beregning av klimafaktor	23
Vedlegg 2: Påregnelig 100-års nedbør for ulike varigheter i prosent av nedbør med 24 og 1 time varighet	26
Vedlegg 3: Bakgrunn fra Meteorologisk Institutt	27

Sammendrag

Ekstremnedbør fører i dag til betydelige kostnader ved oversvømmelser i byer og tettsteder. Det forventes at størrelsen på og hyppigheten av ekstreme nedbørhendelser vil øke som følge av global oppvarming, noe som medfører en økt risiko for oversvømmelse i fremtiden. For å imøtekomme fremtidens utfordringer er det essensielt at overvannssystemer som dimensjoneres i dag har kapasitet til å håndtere den overvannsmengde som forventes i fremtiden. En ofte benyttet metode for å oppjustere overvannsmengden, er å multiplisere nedbørintensiteten med en faktor for forventet relativ økning, kalt klimafaktor. Selv om prinsippet for bruk av klimafaktorer er veletablert, er det store variasjoner i grunnlaget som benyttes for å estimere klimafaktoren. Målet med denne rapporten er å gi en oversikt over hvilke metoder som blir brukt for å ta høyde for fremtidige klimaendringer når overvannssystemer dimensjoneres, og vurdere hvilken metode som er mest hensiktsmessig å benytte i Norge.

Etter en litteraturgjennomgang er det beskrevet 7 ulike metoder hvor effekter av fremtidige klimaendringer på nedbørintensitet er forsøkt ivarettatt. Metodene varierer fra relativt enkle sammenhenger mellom nedbørintensitet og temperaturendringer (Clausius-Clapeyron-forholdet) til mer avanserte statistiske metoder. Vurderingen av metodene er gjort på bakgrunn av de kriterier som fremkommer i litteraturen. Her inngår faktorer som ønsket tidsoppløsning, usikkerhet, datagrunnlag, anvendbarhet og hvorvidt metoden er tilpasset de særskilte klimatiske karakteristikker for Norge.

For Norge vurderes metode nr. 7 (*direkte fra RCM*) som mest hensiktsmessig for estimering av klimafaktorer. Denne metoden baserer seg på at klimafaktorene kan estimeres direkte fra simulerte timesverdier fra regionale klimamodeller. En fordel med metoden er blant annet at den tidligere har blitt benyttet til å estimere klimafaktorer for Oslo og Danmark. Selv om metoden i utgangspunktet vil estimere klimafaktorer for timesnedbør kan en tilleggsanalyse benyttes til å estimere klimafaktorer for kortere varigheter enn 1 time. Dette forutsetter imidlertid god kvalitet på korttidsnedbørmålingene. Der gode nedbørdata ikke foreligger vil det være mulig å benytte empiriske forholdstall mellom timesnedbør og nedbør med kortere varigheter. Anvendelsen av metoden forutsetter at oppgaven utføres av institusjon/etat med tilstrekkelig og relevant kjennskap til regionale klimamodeller. Det forutsettes også at de siste nedskaleringene fra globale klimamodeller (EURO-CORDEX-resultatene) for Norge verifiseres mot observasjoner, og fortrinnsvis post-prosesseres/bias-justeres for å justere for systematiske feil samt gi bedre romlig oppløsning.

For alle metodene, også metode nr. 7, er det åpenbart knyttet stor usikkerhet til estimering av klimafaktorer. For å få ett bilde av usikkerheten anbefales det derfor å beregne klimafaktorer vha. flere beregningsmetoder. En slik tilnærming er benyttet i danske studier hvor det gjennom flere metoder er beregnet middelerdi samt standardavvik for klimafaktorer. Dette vil være nyttig informasjon for å få et bilde på usikkerhetene ved estimatene.

Begrepsavklaring

Delta Change-metoden	Beregningsprinsipp for klimafaktorer. Klimafaktor for nedbørintensitet er gitt av den relative forskjell mellom fremtidig forventet nedbørintensitet og dagens nedbørintensitet.
Ekstremnedbør	Nedbørhendelse som forekommer relativt sjeldent, for eksempel med gjentaksintervall over 20 år, og med potensiale til å skape oversvømmelse i urbane områder.
IVF-data	IVF-data (intensitet-varighet-frekvens) beskriver nedbørintensiteter [$l/(s \cdot ha)$ eller mm] som funksjon av regnvarighet [min] og hyppighet/gjentaksintervall [$år$] for en gitt geografisk lokalitet over en bestemt tidsperiode.
Kaskade-modell	En modell basert på kaos-teori og som følger prinsippet om at enkelte prosesser har den egenskap at de over flere skalaer har den samme egenskap (Arnbjerg-Nielsen, 2006). Tidligere undersøkelser sannsynliggjør at nedbør kan beskrives ved hjelp av kaos-teori. Kaskade-modeller benyttes for å nedskalere den tidsmessige oppløsningen.
Klimafaktor	Forventet fremtidig relativ endring i nedbørintensitet som følge av klimaendringer.
Konsentrasjonstid	Den lengste tiden vannet bruker for å renne fra yttergrensen til utløpspunktet for et gitt nedbørfelt.
Normalperiode	Referanseperiode for nedbørmålinger. Verden meteorologi organisasjon (WMO) benytter perioden 1961-1990.
Overvann	Vann fra nedbør eller snøsmelting som renner på overflaten.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og oppgavemål

Store nedbørmengder og episoder med overvann fører i dag til betydelige kostnader ved oversvømmelser i byer og tettsteder. Det er ventet at utfordringene vil øke i årene som kommer som følge av økt fortetting og forventede effekter av klimaendringer på nedbør, overvann og flom. Ettersom avløpssystemet i norske byer og tettsteder i dag ikke er dimensjonert for å håndtere store mengder overvann, må overvann i fremtiden i større grad håndteres ved ulike lokale tiltak utenom og i tillegg til eksisterende avløpssystem. Skadene ved store mengder overvann rammer både innbyggere, kommuner, forsikringsselskaper, og eiere av veier og annen infrastruktur.

Regjeringen har oppnevnt et utvalg som skal utrede konsekvensene av økte overvannsmengder i norske byer og tettsteder. Utvalget skal gå gjennom gjeldende lovgivning og rammebetingelser for kommunenes håndtering av overvann og komme med forslag til endringer og forbedringer. Formålet med utvalgets arbeid er at kommunen og andre aktører skal ha tilfredsstillende og tydelige rammebetingelser for å kunne håndtere overvann i byer og tettsteder.

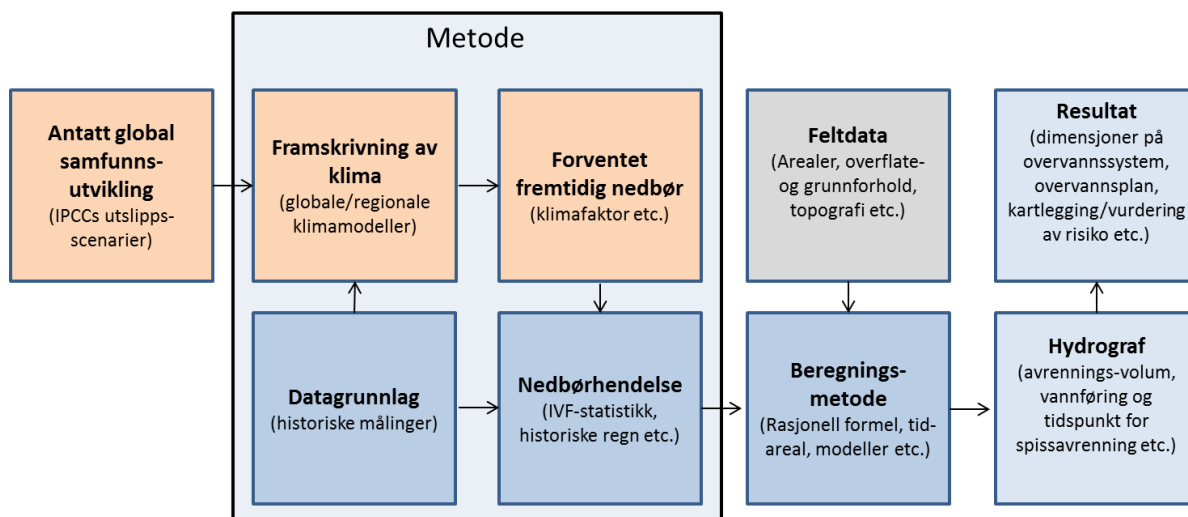
Som et ledd i utvalgets utredningsarbeid etterspørres det en oversikt over hvilke metoder som eksisterer for beregning og estimering av overvann hvor effekter av fremtidige klimaendringer ivaretas. Videre har utvalget behov for vurderinger knyttet til hvor vidt eksisterende metoder er hensiktsmessige og overførbare ift overvannshåndtering i Norge.

Oppgavemålene med prosjektet er følgende:

- 1 Gi en oversikt over hvilke metoder som blir brukt for å ta høyde for fremtidige klimaendringer når overvannssystemer dimensjoneres.
- 2 Vurdere hvilke(n) metode(r) som er mest hensiktsmessig å ta i bruk ved overvannshåndtering i Norge. Vurderingene er hovedsakelig gjort ut i fra behovet til de som beregner overvannsmengder, tilgjengelig datagrunnlag, usikkerhet ved metoden og anvendbarhet for norske forhold.

1.2 Avgrensninger

Med *metoder* forstås i dette prosjektet de fremgangsmåter hvor effekter av forventede klimaendringer på nedbørintensitet er forsøkt ivaretatt, og som kan anvendes for det formål å estimere overvannsmengder. En framstilling av prosedyren om hvordan én går fra historiske målinger og IPCCs utslippsscenarioer til dimensjonering av overvannssystem, overvannsplan og risikovurdering er illustrert i Figur 1. *Metode* omfatter overgangen fra klimamodellers framskrivninger til dimensjonerende nedbørhendelse.



Figur 1: Flytskjema av prosedyren om hvordan én går fra historiske målinger og IPCCs utslippsscenarier til endelig dimensjonering av overvannssystem, overvannsplan og risikovurdering. Metode er definert som overgangen fra klimamodellenes framskrivning til dimensjonerende nedbørhendelse.

Rapporten er avgrenset til å gi en kort innføring i rapporterte metoder, samt vurdere disse ut i fra deres anvendbarhet og overføringsgrad til norske forhold. Det er ikke gitt en full beskrivelse av de enkelte metodene, og det henvises til sitert litteratur for detaljerte beskrivelser.

1.3 Metode og gjennomføring

Del 1 av rapporten gjennomgår eksisterende metoder som fremkommer av litteraturen. Litteraturen er hovedsakelig hentet fra tre kilder:

1. Rapporter og skrifter publisert av den danske spildevandskomiteen. Spildevandskomiteen har de senere år gjort ett omfattende arbeid med å benytte tre ulike beregningsmetoder for estimering av klimafaktorer på ekstremnedbør.
2. Miljøverndepartementet i New Zealand publiserte i 2010 en veileder for hvordan lokale myndigheter kunne gå frem for å estimere effekter av klimaendringer på flomvassdrag (Ministry for the Environment, 2010). Som en del av arbeidet i rapporten ble det gjennomgått ulike metoder for hvordan effekter av klimaendringer på nedbørintensitet kunne estimeres.
3. Øvrige metoder i publikasjoner i anerkjente vitenskapelige tidsskrifter. Dette relaterer seg hovedsakelig til studier utført for Canada, Danmark, Sverige og Spania.

Del 2 av rapporten gjennomgår en vurdering av metodene ut i fra behovet til de som beregnet overvannsmengder, sammenheng mellom nødvendig og tilgjengelig datagrunnlag, usikkerhet ved metoden og anvendbarhet for Norge. På bakgrunn av vurderingene er det gjort noen endelige anbefalinger med hensyn til metode-valg og videre arbeid.

Rapporten er utarbeidet av COWI i samarbeid med Meteorologisk institutt, Norges vassdrag og energidirektorat og Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

2 Bakgrunn

2.1 Dimensjonerende nedbørintensitet

Beregning av overvannsmengder i urbane områder er nødvendig for å gjennomføre risikovurderinger knyttet til oversvømmelse, utarbeiding av overvannsplaner samt for å bestemme tilstrekkelig dimensjoner for systemet som skal håndtere overvann. I urbane nedbørfelt med en relativt stor andel tette flater og begrenset geografisk utstrekning estimeres normalt overvannsmengder fra den rasjonelle formel:

$$Q = A \cdot \varphi \cdot I \quad (1)$$

Hvor Q er dimensjonerende vannføring [l/s], A er nedbørfeltets størrelse [ha], φ er nedbørfeltets midlere avrenningskoeffisient [-] og I er dimensjonerende nedbørintensitet [l/sha]. Mens verdier for nedbørfeltets størrelse og midlere avrenningskoeffisient baseres på kunnskap om feltet, vil verdier for dimensjonerende nedbørintensitet hentes fra lokal IVF-statistikk (for eksempel www.eklima.no). Valget av dimensjonerende nedbørintensitet gjøres ut i fra ønsket gjentakintervall og den regnvarighet som vil være verst tenkelig for systemet og dermed kreve de største dimensjonene.

Den dimensjonerende nedbørintensiteten varierer som en funksjon av tidsmessige og geografiske forhold:

$$I = I(GI, T, Z, t) \quad (2)$$

Hvor GI er gjentakintervallet for den aktuelle nedbørintensitet [år], T er regnvarigheten for den aktuelle nedbørintensitet [min], Z er den geografiske lokaliteten til nedbørintensiteten og t er den historiske perioden som IVF-statistikken er beregnet for (f.eks. fra år 1988 til år 2008).

Den dimensjonerende nedbørintensitet vil i tillegg til de variablene som inngår i likning 2, også kunne variere fra sesong til sesong. For eksempel, for Østlandet er det normalt høyere nedbørintensitet på ekstremhendelser om sommeren enn om vinteren. IVF-statistikken som foreligger for Norge differensierer imidlertid ikke mellom sesonger for nedbørintensiteter og evt. årstidsforskjeller er derfor ikke ivare tatt.

2.2 Klimafaktor

Det forventes i Norge og store deler av verden at størrelsen på og hyppigheten av ekstreme nedbørhendelser vil øke som følge av global oppvarming (Hanssen-Bauer, et al., 2009). En økning av ekstreme nedbørhendelser betyr også en økning av dimensjonerende nedbørintensiteter. En ofte benyttet metode for å ivareta de forventede effektene av klimaendringer er å multiplisere nedbørintensiteten i likning 1 med en forventet relativ økning av nedbørintensitet, en såkalt klimafaktor (K_f). Med klimafaktor forstås her den faktor en må multiplisere dagens dimensjonerende nedbørintensitet med, for å få den ønskede fremtidige dimensjonerende nedbørintensitet. Tilsvarende som for nedbørintensiteten vil klimafaktoren være en funksjon av flere variabler. Matematisk kan klimafaktoren uttrykkes som:

$$K_f(GI, t + \Delta t, T, Z, S) = \frac{I(GI, t + \Delta t, T, Z, S)}{I(GI, t, T, Z)} \quad (3)$$

Hvor K_f er klimafaktoren [-] og I er dimensjonerende nedbørintensitet under gitte forhold [l/sha eller mm]. Disse forholdene omfatter gjentakintervallet (GI), regnvarigheten (T), den geografiske plasseringen (Z), referanse perioden eller nåtid (t), varighet på framskrivingsperioden (Δt) og det klimascenariet som er lagt til grunn for framskrivningene (S).

Klimafaktorer som tilnærming for å ivareta effekter av klimaendringer på dimensjonerende overvannsmengder er benyttet i flere land (Gregersen, et al., 2014; Svensk Vatten, 2011; Statens vegvesen, 2014; Jernbaneverket, 2014; Lindholm, et al., 2008; Ministry for the Environment, 2008). I Tabell 1 er det gitt en oversikt over land og tilhørende institusjoner som anbefaler bruk av klimafaktorer for beregning av fremtidige overvannsmengder. I tillegg finnes det enkelte kommuner i Norge som ar tatt standpunkt til klimafaktorer (Kristiansand kommune, 2014).

Tabell 1: Oversikt over land og institusjoner hvor klimafaktor anbefales ved beregning overvannsmengder.

Lokalitet	Beskrivelse
City of London, Canada	City of London, Canada, vedtok i 2011 at det skal benyttes en klimafaktor på 1,21 ved beregning av overvannsmengder (City of London, 2011). Vedtaket kom som en direkte konsekvens av én studie av Peck et al. (2012) hvor værgenerator-modellen benyttet for nedskalering av klimamodell-resultater, fra døgn- til minutt-verdier. Som en direkte konsekvens av resultatene som fremkom i studiet ble det vedtatt av kommunen i 2011 å øke IVF-data for City of London med 21 %, tilsvarende er klimafaktor på 1,21 (City of London, 2011).
Danmark	Den danske Spildevandskomitéen anbefaler bruk av klimafaktorer ved dimensjonering av avløpssystemer og vurdering av fremtidige overvannsmengder (Gregersen, et al., 2014; Arnbjerg-Nielsen, 2008). Ved å beregne klimafaktorer via ulike metoder (se kap. 3.3, 3.5 og 3.7) har den danske Spildevandskomitéen foreslått to typer klimafaktorer: Én <i>standard</i> klimafaktor som er det beste estimat på forventede utvikling i ekstremnedbør, og én <i>høy</i> klimafaktorer som tilsvarer én <i>standard</i> klimafaktor addert med ett standardavvik. Videre er både <i>standard</i> og <i>høy</i> klimafaktorer differensiert med hensyn til framskrivingsperiode og gjentakintervall. Klimafaktorene varierer fra 1,1 (<i>standard</i> verdi, 50 år frem i tid og 2 års gjentakintervall) til 2,0 (<i>høy</i> verdi, 100 år frem i tid og 100 års gjentakintervall).
New Zealand	Miljøverndepartementet på New Zealand anbefaler bruk av klimafaktorer ved beregning av avrenning fra ekstremnedbør (Ministry for the Environment, 2008). Klimafaktorer er basert på Clausius-Clapeyron-forholdet (se kap. 3.1 og 3.2) og differensiert med hensyn til regnvarighet, gjentakintervall og forventet temperaturendring. Klimafaktorene varierer fra 1,0 til 1,5 hvorav de høyeste verdiene er relevante for regnvarigheter kortere enn 10 minutter, gjentakintervall på mer enn 50 år og en temperaturøkning på mer enn 4,0 °C.
Norge	I Statens vegvesen håndbok N200 vegbygging anbefales det å benytte klimafaktorer ved beregning av overvannsmengder for små felt (Statens vegvesen, 2014). Det anbefales å benytte differensierte klimafaktorer med hensyn til forventet levetid på installasjonen på henholdsvis 1,3 (10 år), 1,4 (100 år) og 1,5 (200 år).

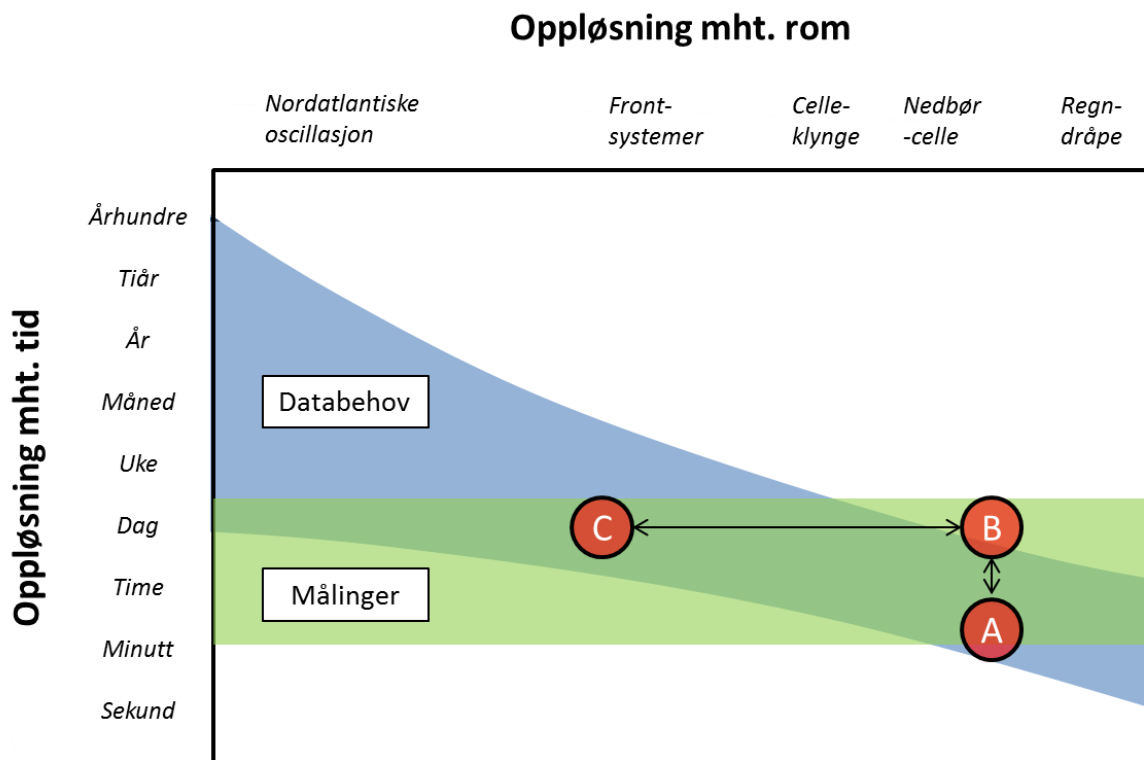
Lokalitet	Beskrivelse
Norge	Jernbaneverket har krav om å benytte ett gjentakintervall på 200 år og en klimafaktor på 1,2 for dimensjoneringsberegninger av stikkrenner og øvrig dreneringsanlegg (Jernbaneverket, 2014).
Norge	I Norsk Vann rapport 193, <i>Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem</i> (2012) gjennomgås det klimafaktorer som er anbefalt i Sverige og Danmark. Norsk Vann anbefaler at det benyttes en klimafaktor på mellom 1,3 og 1,5 for dimensjonering av nye avløpsanlegg med levetid på 100 år. Det spesifiseres at klimafaktorene skal benyttes på IVF-statistikk som er utarbeidet før år 2011.
Sverige	I Svensk Vatten rapport P104, <i>Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem</i> , anbefales det å benytte klimafaktorer fra 1,05 til 1,3 ved dimensjonering av overvannssystemer (Svensk Vatten, 2011).

Selv om prinsippet om klimafaktorer er veletablert, er det store variasjoner i forhold til metoder som benyttes for å estimere verdiene. I det videre er det gjennomgått beregningsmetoder for klimafaktorer som rapportert verdier i Tabell 1 samt øvrige metoder som er rapportert i litteraturen.

DEL 1:

3 Metoder for beregning av klimafaktorer

Framskrivningene som benyttes til å estimere hvordan intensiteten på ekstremnedbør vil endre seg i fremtiden, og som dermed gir grunnlaget for beregning av klimafaktorer, er basert på resultater fra klimamodeller. Normalt benyttes det resultater fra regionale klimamodeller (RCM), som videre bygger på resultater fra globale klimamodeller (GCM). Selv om de regionale klimamodellene gir framskrivninger med en betydelig høyere oppløsning i tid og rom (f.eks. døgnerverdier for felter med størrelse 25 x 25 km²) enn det de globale klimamodellene gjør (f.eks. 200 x 200 km²), er resultatene fra de regionale klimamodellene likevel svært grove sammenliknet med det som har relevans for små urbane felt hvor nedbørhendelser med varighet under én time ofte er dimensjonerende. For eksempel, en gjennomgang av Nilsen et al. (2011), viser at de generelle anbefalinger i litteraturen med hensyn til urbanhydrologiske data er at de bør ha en temporal oppløsning på 1 til 5 minutter og romlig oppløsning på 1 til 5 km². Derfor, for at framskrivningene fra klimamodeller skal kunne benyttes til urbanhydrologiske formål er det nødvendig at klimamodellens resultater nedskaleres tilstrekkelig i både tid og rom. En slik nedskalering av resultater fra en klimamodell er illustrert i Figur 2. Klimamodellens framskrivning av døgnerverdier for frontsystemer (punkt C) nedskaleres til høyere romlig oppløsning (punkt B) samt høyere tidsmessige oppløsning (punkt A). Klimafaktoren kan tolkes som forholdet mellom ekstremnedbør i punkt A for fremtidens klima og dagens klima.



Figur 2: Nødvendige trinn for å nedskalere resultater fra klimamodeller (pkt. C) til fremtidig nedbørintensiteter med tilstrekkelig oppløsning mht. tid og rom (pkt. A). Figuren er omarbeidet fra Arnbjerg-Nielsen (2008) og Berndtsson et al. (1988).

Det eksisterer flere metoder for beregning av klimafaktorer. En ofte benyttet tilnærming som baserer seg på å sammenlikne egenskaper ved historisk ekstremnedbør for en normalperiode med tilsvarende egenskaper for framskrevet ekstremnedbør fra globale eller regionale klimamodeller er Delta Change. Innenfor Delta Change-tilnærmingen eksisterer det flere variasjoner (Semadeni-Davies, et al., 2008; Nilsen, et al., 2011; Olsson, et al., 2009). Klimafaktorene omtalt i denne rapporten representerer sådan Delta Change-faktorer for ekstremnedbør. I tillegg eksisterer det metoder hvor klimaendringers effekt på nedbørintensitet er forsøkt ivaretatt uten den type nedskalering som er angitt i Figur 2. Felles for alle metodene er følgende:

- › Metoden benytter framskrivninger fra regionale og/eller globale klimamodeller for å estimere hvordan nedbørintensiteter forventes å endre seg i fremtiden.
- › Metoden gir som resultat forventede nedbørintensiteter i fremtiden. Én eller flere klimafaktorer kan dermed estimeres ved å sammenlikne de forventede nedbørintensiteter i fremtiden med nedbørintensiteter for en bestemt referanseperiode (nåtid).

I påfølgende kapitler er det gitt beskrivelser av syv metoder for beregning av klimafaktorer med varierende tilnærminger til nedskalering og/eller andre tilnærminger for å ivareta forventede effekter av klimaendringer på dimensjonerende nedbørintensiteter. En oppsummert sammenstilling av metodenes beskrivelse og nødvendig datagrunnlag samt vurderinger av styrker og svakheter er gitt i vedlegg 1.

3.1 Metode 1: Clausius-Clapeyron-likningen

En metode for nedskalering av klimamodell-resultater benytter det faktum at atmosfærens kapasitet til å holde på vann korrelerer positivt med atmosfærens temperatur. Denne sammenhengen beskrives av Clausius-Clapeyron-forholdet og tilsier at atmosfærens kapasitet til å holde på vann øker med ca. 7 til 8 % per °C. Forholdstallet kan benyttes til å estimere utvikling av regnhendelser med høy intensitet på bakgrunn av de forventede temperaturendringer i fremtiden. Eksempelvis, hvis det forventes en midlere temperaturøkning på 5 °C, kan Clausius-Clapeyron-forholdet benyttes til å estimere en økning av nedbørintensitet på 35 til 40 %, tilsvarende en klimafaktor på 1,35 til 1,40.

Ett eksempel hvor Clausius-Clapeyron-forholdet er anvendt som metode for nedskalering av resultater fra regionale klimamodeller er på New Zealand. I rapporten *Climate change effects and impacts assessment*, publisert av Miljøverndepartementet på New Zealand (2008), er det gitt tabeller hvor klimafaktorer beregnes på bakgrunn av verdier for forventet prosentvis økning i nedbør som funksjon av temperaturendring. For å illustrere er det gitt et utdrag av verdiene for New Zealand i Tabell 2. Clausius-Clapeyron-sammenhengen er benyttet for regnhendelser med varighet på 10 minutter, og resultater fra regionale klimamodeller for regnhendelser med varighet på 24 timer. For å estimere økning i intensitet for andre varigheter er gjennomført en logaritmisk interpolering mellom verdier for 10 minutter og 24 timer. Verdiene i tabellen strekker seg fra 8 % per 1 °C, for regn med kort varighet og/eller høyt gjentakintervall, til 3,5 % per 1 °C for regn med 72 timers varighet og 2 års gjentakintervall. Med utgangspunkt i midlere forventet temperaturøkning på New Zealand (2,5 °C ved år 2090 for A2 scenariet), kan det beregnes at klimafaktorene varierer fra 1,09 til 1,20 avhengig av gjentakintervall og regnvarighet.

*Tabell 2: Prosentvis økning av intensitet for ekstremnedbør per °C økning i midlere lufttemperatur for varierende gjentakintervall og regnvarighet for New Zealand. Verdier i tabellen er hentet fra rapporten *Climate change effects and impacts assessment* publisert av Miljøverndepartementet på New Zealand (2008). Verdier med kort (10 min) og lang (24 timer) varighet er bestemt fra henholdsvis Clausius-Clapeyron-forholdet og regional klimamodeller. Mellomliggende verdier er bestemt ved logaritmisk interpolasjon.*

	Gjentaksintervall						
Varighet	2 år	5 år	10 år	20 år	30 år	50 år	100 år
< 10 min	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
10 min	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
30 min	7,2 %	7,4 %	7,6 %	7,8 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
1 time	6,7 %	7,1 %	7,4 %	7,7 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
2 timer	6,2 %	6,7 %	7,2 %	7,6 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
3 timer	5,9 %	6,5 %	7,0 %	7,5 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
6 timer	5,3 %	6,1 %	6,8 %	7,4 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
12 timer	4,8 %	5,8 %	6,5 %	7,3 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %
24 timer	4,3 %	5,4 %	6,5 %	7,2 %	8,0 %	8,0 %	8,0 %

Som vist i Tabell 2 er det usikkert hvor vidt det faktisk er nødvendig med verdier for framskrevet døggnedbør hvis data skal benyttes til å bestemme dimensjonerende verdier for overvannssystemer. For overvannssystemer, hvor dimensjonerende nedbør har varighet på mindre 30 minutter og/eller har gjentakintervall på mer enn 20 år, vil i følge Tabell 2 forholdstallet konsekvent være 8 % per °C.

Metoden med å bruke Clausius-Clapeyron-forholdet til å beregne klimafaktorer har en åpenbar styrke i at fremgangsmåten for nedskalering er svært enkelt og kan utføres av personell uten spesiell kompetanse/ekspertise. Metoden vil kunne estimere klimafaktorer uten bruk av avanserte modeller da kun framskrivninger på lufttemperatur og døggnedbør er nødvendige. Dette medfører at klimafaktorer kan raskt oppdateres når nye framskrivninger for temperatur foreligger.

Studier indikerer imidlertid at det er flere svakheter med å bruke Clausius-Clapeyron-forholdet til å estimere klimafaktorer for fremtidig nedbørintensiteter. Clausius-Clapeyron-forholdet gir uttrykk for den potensielle vannmengden som kan holdes i atmosfæren, og gir dermed uttrykk for den teoretiske verst tenkelige situasjon. Gyldigheten til Clausius-Clapeyron forutsetter også at det ikke forekommer store endringer i relativ fuktighet, værtyper eller i store sirkulasjonsmønstre (Westra, et al., 2014). Det kan heller ikke utelukkes at forholdstallet vil kunne overstige 8 % per °C i fremtiden (Ministry for the Environment, 2010). Eksempelvis vises en slik underestimering av forholdstallet gjennom ett studie av Lenderink og Meijgaard (2008) hvor ekstremverdier for timenedbør og verdier for lufttemperatur i Nederland ble analysert. Analysen viste at forholdsverdiene for timenedbøren økte

det dobbelte av hva Clausius-Clapeyron-forholdet tilsa når lufttemperaturen var høyere enn 12 °C. I samme studie ble det også vist gjennom simuleringer at timenedbøren for store deler av Europa øker med om lag 14 % per °C. Videre er det knyttet stor usikkerhet til benyttelse av framskrivninger for midlere temperaturer. Som følge av naturlige temperaturvariasjoner vil normalt temperaturen på dager med ekstremnedbør være ulik den midlere temperaturen.

3.2 Metode 2: Empirisk justering

Metoden benytter midlere månedsverdier for forventet endring i nedbørmengde og temperatur til å beregne hvordan antall dager med nedbør endres og videre hvordan verdier for døgnnedbør vil endre seg. Metoden er omtalt i rapporten *Tools for estimating the effects of climate change on flood flow* publisert av Miljøverndepartementet på New Zealand (2010). Antall dager med nedbør antas å minke med 1,75 % per 1 °C økning i temperatur. Denne sammenhengen mellom temperaturøkning og antall dager er basert på en analyse av ekstremnedbør for punkt-lokaliteter i Wellington-regionen. Videre defineres så Clausius-Clapeyron-likningen øvre grense for hvor mye nedbør som vil kunne falle i løpet 24 timer.

Metoden gjennomføres ved hjelp av manuell beregning og er derfor svært enkel i bruk. Nødvendig datagrunnlag omfatter midlere månedsverdier for historisk og framskrevet temperatur og nedbør. I rapporten *Tools for estimating the effects of climate change on flood flow* fremgår det et beregningseksempel som viser hvordan en benytter metoden til å beregne forventet døgnnedbør. Ved å sammenlikne historisk døgnerverdier for nedbør med framskrivningene vil klimafaktorer kunne beregnes.

Metoden har en åpenbar svakhet i at den kun estimerer klimafaktorer for døgnnedbør. Nedbørhendelser med varighet på 24 timer vil ikke være tilstrekkelig i forbindelse med dimensjonering av overvannssystemer for urbane områder. Metoden benytter også Clausius-Clapeyron-forholdet for beregning av maksimal nedbør og har derfor tilsvarende svakheter som Metode 2. Videre er det knyttet stor usikkerhet til sammenhengen mellom temperaturøkning og reduksjon i antall dager med nedbør. Denne metoden vil kreve lokale analyser av ekstremnedbør tilsvarende de som ble gjort for Wellington-regionen.

3.3 Metode 3: Stokastiske værgeneratorer

En stokastisk værgenerator er en statistisk empirisk modell som simulerer dataserier for klimatologiske parametere som nedbør, temperatur, stråling og vind. Prinsippet med metoden er at et begrenset antall pseudo-fysiske parametere kan benyttes til gi tilstrekkelig beskrivelse av nedbørserier (Arnbjerg-Nielsen, 2008). Modellen kalibreres først mot historiske data og justeres deretter mot simulerte tidsserier for fremtidig klima fra en klimamodell. Det nødvendige datagrunnlaget for metoden er dermed både historiske data og klimaframskrivninger.

Stokastisk værgeneratorer er anvendt i forbindelse med modellering av klimatologiske parametere i landbruket (Ministry for the Environment, 2010). Normalt benyttes det da en tidsmessig oppløsning på ett døgn. Modeller har imidlertid også blitt anvendt for å beskrive påvirkning av klimaendringer på nedbørhendelser med kortere varighet enn 24 timer. Arnbjerg-Nielsen (2008) benyttet en stokastisk værgenerator (*Rainfall Parameter Barlett-Lewis Rectangular Pulse*) til å beskrive pseudo-fysiske parametere for historiske og fremtidige nedbørserier med tidsoppløsning på 1 time. I studiet ble det benyttet totalt 8 pseudo-fysiske parametere for å beskrive nedbørserier. Selv om de 8 parameterne karakteriserer tiden mellom nedbørhendelser, antallet nedbør-celler og cellenes tidsmessige utstrekning og intensitet, har de ingen reell fysisk tolkning. Arnbjerg-Nielsen oppsummerer beregningen av klimafaktorer via stokastisk værgeneratoren som følgende:

- 1) Modellen benyttes til å beskrive historiske nedbørserier med tilstrekkelig tidsoppløsning (punkt A i Figur 2).
- 2) Modellen benyttes til å beskrive parametere for historiske data med den tidsoppløsning klimamodellen benytter (punkt B i Figur 2).
- 3) Forskjellene mellom de 8 parameterne for historisk data (punkt B i Figur 2) og framskrevet data (punkt C i Figur 2) blir beregnet. Forskjellene uttrykkes som en endringsfaktor for hver av de 8 parameterne.
- 4) På bakgrunn av endringsfaktorene for de 8 parameterne beregnes samlede klimafaktorer for endring i nedbørintensitet for gitte varigheter og gjentaksintervall.

Stokastiske værgeneratorer har blitt benyttet til å estimere klimafaktorer for Danmark i flere studier (Gregersen, et al., 2014; Arnbjerg-Nielsen, 2008; Gregersen, 2014). I likhet med Arnbjerg-Nielsen (2008), benyttet Gregersen (2014) modellen til å beskrive historiske og fremtidige nedbørserier. I studiet til Gregersen ble det benyttet en stokastisk værgenerator (*Neyman-Scott Rectangular Pulse*), via programmet *RainSim* (Burton, et al., 2008), til å nedskalere den romlige oppløsningen fra de regionale klimamodellene fra 25 x 25 km² til 10 x 10 km². Videre, for å nedskalere den tidsmessige oppløsningen fra døgnverdier til halvtimesverdier ble det benyttet en separat temporal dissaggregering via en randomisert kaskade-modell. De genererte nedbørserier for det fremtidige klima ble analysert for ekstremhendelser og klimafaktorer ble så utledet ved å se på forskjellen mellom historiske og fremtidige ekstremhendelser.

Stokastiske værgeneratorer har også blitt benyttet til beregning av klimafaktorer for City of London, Ontario, Canada. I én studie av Peck et al. (2012) ble værgeneratoren benyttet for nedskalering av klimamodell-resultater, fra døgn- til minutt-verdier. Som en direkte konsekvens av resultatene som fremkom i studiet ble det vedtatt av kommunen i 2011 å øke IVF-data for City of London med 21 %, tilsvarende er klimafaktor på 1,21 (City of London, 2011).

I studiet utført av Gregersen (2014) ble det påpekt at egenskapene ved de simulerte nedbørserier var urealistiske sammenliknet med de observerte egenskaper for historiske nedbørserier. Det ble i studie konkludert at metoden var uegnet til å beskrive de endringer i kortidsnedbør som er vesentlig for dimensjonering av urbane overvannssystemer. Tilsvarende ble det påpekt i Arnbjerg-Nielsen (2008) at metoden må prioriteres lavt når formålet er å bestemme klimafaktorer for ekstreme hendelser. Argumentasjonen for dette var at metoden fokuserer mest på gjennomsnittlige nedbørsmønstre og i mindre grad ekstremnedbørhendelser. I tillegg er skaleringen fra time- til minutt-verdier via kaskade-modellen utelukkende basert på de historiske nedbørserier. På den måten antas det at skaleringen er uendret av klimaendringer. En slik form for skaleringen ble av Arnbjerg-Nielsen (2008) betegnet som lite god, spesielt mht. nedbørhendelser med høy intensitet og varighet under 1 time som ble systematisk undervurdert for normalperioden. Klimafaktorer for korte varigheter må derfor beregnes under forutsetning av at skaleringen er like dårlig for normalperioden som for framskrivningen.

Usikkerheten på parametere gitt fra værgeneratoren er i stor grad avhengig av kvaliteten på det historiske datagrunnlaget den er kalibrert mot. For eksempel, hvis ikke de historiske dataene inneholder en representativ stokastisk fordeling for kortidsnedbør, vil ikke værgeneratorer klare å generere hele spektret av nedbør og på den måten kunne utelate ekstremnedbør med høye gjentaksintervall. Dette medfører at metoden er best egnet for lokaliteter med lange nedbørserier med den varighet som ønskes for fremtidig nedbørintensitet.

3.4 Metode 4: Analogt utvalg av historiske data

Denne metoden baserer seg på utvelgelse av en periode med historiske nedbørintensiteter hvor klima har de egenskapene som forventes å være representativt for fremtiden. Dette kan for eksempel være observerte nedbørintensiteter for varme år. Metoden har blitt anvendt i en studie av Sansom og Renwick (2007) hvor effekter av fremtidige klimaendringer på nedbør ble undersøkt for New Zealand. I dette studiet ble historiske nedbørserier for 60 varme måneder på New Zealand analysert og tolket som hvordan nedbøren vil kunne utvikle seg 50 år frem i tid. Metoden er svært enkel og man kan velge ut ett større antall analoge perioder hvis det eksisterer lange tidsserier. Metoden vil gi nedbørintensiteter med høy tidsoppløsning.

Utvelgelsen av analoge perioder må gjøres på grunnlag av de forventede endringer i temperatur og nedbør som framskrives av klimamodeller. Det eksisterer ulike metoder for utvelgelse av analoge perioder metoden er derfor subjektiv. Nødvendig datagrunnlag er historiske data for utvelgelse av analoge periodene samt framskrivninger fra klimamodeller.

En stor svakhet ved analog-metoden er at den ikke kan gi høyere verdier enn det som allerede er observert. Det er heller ikke gitt at det er vær-situasjonen for dagens varme perioder (måneder/døgn) som vil gi de høyeste nedbørverdiene i fremtiden.

3.5 Metode 5: Analogt klimaområde

Metoden benytter et analogt klimaområde for å estimere framskrivninger i nedbørintensiteter for en annen lokalitet (Hallegatte, et al., 2007). Ett analogt klimaområde er et område, eller region, hvor klima i dag tilsvare det som forventes å gjelde for lokaliteten. Klimafaktoren beregnes ved å sammenlikne ekstremhendelser i det analoge klimaområdet med ekstremhendelser for lokaliteten. Utvelgelsen av analogt klimaområde for lokaliteten gjøres ved å sammenlikne informasjon om landtype (kyst, innland, høyde over havet) samt forventede endringer i temperatur og nedbør.

Analogt klimaområde har blitt benyttet til å estimere klimafaktorer for Danmark (Arnbjerg-Nielsen, 2008; Gregersen, 2014; Gregersen, et al., 2014). Arnbjerg-Nielsen (2008) valgte det analoge klimaområde for Danmark som lavtliggende områder i Tyskland, Frankrike, Nederland og Belgia. Utvelgelsen ble gjort på bakgrunn av høyde over havet, nærhet til Nordsjøen og mengden data ved målestasjonene i regionen.

En styrke ved metoden er at den gir mulighet til å bestemme dimensjonerende regnhendelser uten lokale historiske data, samt at den gir nedbørintensiteter med høy tidsoppløsning. Metoden for utvelgelse av klimaområde(r) kan imidlertid variere og er per definisjon en subjektiv metode. Videre er det en forutsetning ved metoden at det eksisterer analoge klimaområder med tilstrekkelig datamengde.

3.6 Metode 6: Døgnnedbør fra RCM

Den enkleste metoden for nedskalering av resultater fra regionale klimamodeller (RCM) er å forutsette at variasjonene i nedbørintensiteter med varighet under 24 timer forblir uendret i fremtiden. For eksempel, om verdien på en nedbørintensitet med varighet på 1 time i dag utgjør 25 % av verdien på en nedbørintensitet med varighet på 24 timer for samme gjentakintervall (se Figur 3 i Vedlegg 2), vil dette forholdstallet på 25 % forbli uendret som følge av klimaendringer i fremtiden. Dette tilsvarer en antagelse om at klimafaktoren i likning 3 er uavhengig av varigheten. På den måten kan klimafaktorer bestemmes direkte via Delta Change-metoden ved å sammenlikne resultater for 1-døgns nedbør fra en klimamodell med historiske data.

Metoden har tidligere blitt anvendt i en studie av Rodríguez et al. (2014) for Barcelona, Spania, hvor klimafaktorer til IVF-statistikk ble utledet basert på resultater fra regionale klimamodeller.

Metodens styrke er at den er svært enkel å anvende samt at én vil kunne estimere klimafaktorer direkte ved å sammenlikne resultater fra en regional klimamodell med historiske døgnverdier for nedbør. Metodens svakhet er at det er knyttet stor usikkerhet til antagelsen om at klimafaktoren er uavhengig av varigheten. I litteraturen fremkommer det at ekstremhendelser med varighet under 1 time vil relativt sett øke mer enn ekstremhendelser med lengre varigheter (Westra, et al., 2014; Arnbjerg-Nielsen, 2008). Metoden vil derfor systematisk underestimere klimafaktoren for de ekstremhendelser som har betydning for urbane overvannssystemer.

For Norge foreligger det projeksjoner for endringer i hyppighet og nedbørintensitet for dager med mye nedbør (Hanssen-Bauer, et al., 2009). En mer detaljert beskrivelse av projeksjonene er gitt i vedlegg 3. Resultatene er basert på simuleringer for den forrige IPCC-rapporten (IPCC, 2007), og kan benyttes til tentative estimat av klimafaktorer for endringer i døgnnedbør fra 1961-90 til 2071-2100 for ulike landsdeler og årstider. Det foreligger p.t. ikke kvalitetssikrede resultater for kortere varighet enn 1-døgn, og resultatene kan derfor foreløpig ikke differensieres for kortere varigheter. Bruk av klimafaktoren gitt i tabell 3 i Vedlegg 3 vil derfor trolig gi et underestimat av klimafaktorer for korte varigheter.

3.7 Metode 7: Direkte fra RCM

Bestemmelse av klimafaktor direkte fra simulerte timesverdier fra regionale klimamodeller (RCM) har blitt utført for Oslo (Nilsen, et al., 2011; Nilsen, 2008) og for Danmark (Arnbjerg-Nielsen, 2008; Gregersen, 2014; Gregersen, et al., 2014). I studiet til Nilsen et al. (2011) ble metoden benyttet til å estimere klimafaktorer for Oslo med det formål å analysere klimaendringers påvirkning på urban oversvømmelse og overløpsdrift perioden 2071-2100. Arbeidet til Nilsen et al. representerer det første i Norge hva det gjelder å utvikle nedbørserier med høy tidsoppløsning for et fremtidig klima.

I studiet til Arnbjerg-Nielsen (2008) ble metoden benyttet til å estimere landsdekkende gjennomsnittlig klimafaktorer for nedbørhendelser med ulike varigheter. De estimerte klimafaktorene for de ulike varighetene indikerte at de største hendelsene vil forekomme hyppigere og at størrelsen på de største nedbørhendelsene vil øke. Nylig ble metoden også benyttet av Gregersen et al. (2014), men med ett større datagrunnlag enn det. Datagrunnlaget omfattet resultater fra det europeiske prosjektet ENSEMBLES utført for perioden 1950 til 2100. To av simuleringene i ESEMBLES, fra de regionale klimamodellene HIRHAM5 og ERACMO2 som begge er basert på den globale modellen ECHAM5, har en oppløsning på timesverdier. I studiet til Gregersen ble simuleringene fra disse to modellene benyttet direkte for å estimere klimafaktorer via Delta Change-metoden.

For Europa foreligger det nå en rekke nedskaleringer fra globale klimamodeller som ble kjørt i forbindelse med den siste IPCC-rapporten (IPCC, 2013). Simuleringene er tilgjengelige på <http://www.euro-cordex.net/>, og en del modell-resultat har en romlig oppløsning på 11 x 11 km² og tidsoppløsning på 3 timer (noen få har ned til 1 time). Når EURO-CORDEX resultatene er ferdig kvalitetssikret kan klimafaktor ned til 1 eller 3 timer baseres direkte på disse simuleringene. Resultatene kan videre benyttes til å studere forskjeller i klimafaktor for 1, 3 og 24 timer.

Det diskutabelt hvor vidt resultater fra regionale klimamodeller kan benyttes til å beregne klimafaktorer direkte. Selv med relativt sett høy romlig og tidsmessig oppløsning vil det være stor usikkerhet knyttet til deres beskrivelse av ekstremnedbør. En betydelig årsak til dette er at klimamodellene kalibreres for temperatur og ikke nedbør.

DEL 2

4 Vurderingskriterier

For å vurdere de ulike metodene fra oppgavemål 1, og for å besvare oppgavemål 2, er det utarbeidet vurderingskriterier som vist i Tabell 3 (kfr. s. 6). Vurderingene er gjort på bakgrunn av de forhold og vurderinger som fremkommer i litteraturen vedrørende tidsoppløsning, usikkerhet, datagrunnlag, anvendbarhet og de særskilte fysiske karakteristikker for Norge.

Tabell 3: Kriterier for vurdering av metoder for beregning av fremtidige overvannsmengder.

Kriterie	Forklaring
----------	------------

Tidsoppløsning	Tidligere studier viser at timesnedbøren typisk vil øke prosentvis mer enn døgnnedbøren. Det er derfor vesentlig at klimafaktoren(e) beskriver den forventede økning i nedbørmengde for de regnhendelser med varighet representativt for urbane felt. Konsentrasjonstiden i urbane felt er ofte mindre enn 1 time. For beregning av overvannsmengder i urbane områder hvor klimaeffekter skal ivaretas er det derfor nødvendig med klimafaktor(er) for regnhendelser med varighet mindre enn 1 time.
Usikkerhet	Usikkerheten ved estimert klimafaktor(er) bør generelt være så lav som mulig. Inneholder metoden antagelser og/eller forenklinger som er omstridte eller det herskes tvil om, vil dette kunne gi estimer med uønsket stor usikkerhet. I tillegg er det åpenbart at minimalisering av usikkerheten avhenger av at beregningen av klimafaktorer baseres på de siste oppdaterte tilgjengelige framskrivninger. IPCC publiserer oppdaterte framskrivninger basert på simuleringer av globale klimamodeller om lag hvert 5. år. De siste framskrivninger vil alltid være bedre enn de forrige da klimamodellene er forbedret samt at det foreligger ett større datagrunnlag for kalibrering og simulering. En god metode for beregning av klimafaktorer bør derfor ha evnen til å kunne oppdateres for nye framskrivninger kort tid etter at de publiseres.
Datagrunnlag	Det nødvendige datagrunnlaget for benyttelse av metoden bør gjenspeile det tilgjengelige datagrunnlaget som eksisterer i Norge. Tilgjengelige datagrunnlag utgjøres av historiske data som kommunen besitter, historiske data som kan lastes ned fra www.eKlima.no , framskrivninger fra regionale klimamodeller og framskrivninger fra globale klimamodeller.
Anvendbarhet	Det ansees som en fordel om metoden kan benyttes av personell uten spesiell kompetanse/ekspertise, og at oppdaterte klimafaktorer kan estimeres uten betydelig ressursbruk.
Fysiske forhold i Norge	Det er nødvendig at metoden for beregning av klimafaktorer fanger opp de karakteristiske forhold for hele Norge. Norge er karakterisert med store variasjoner i topografi, orografi, temperatur og værmønstre og er inndelt i 13 ulike regioner for langtids nedbørendringer (Hanssen-Bauer, et al., 2009).

5 Diskusjon

Basert på kriteriene i Tabell 3 er metodene i kap. 3 vurdert med den hensikt å estimere klimafaktorer for Norge. Vurderingen av hver enkel metode er oppsummert i Vedlegg 1 og utdypet nedenfor.

Metode 1 (*Clausius-Clapeyron-likningen*) representerer en svært enkel tilnærming til estimering av klimafaktorer for ekstremnedbør med kort varighet ved å benytte Clausius-Clapeyron-likningen. For Norge vil selv små endringer i storstilt atmosfærisk sirkulasjon kunne føre til store endringer i fuktighetstilførsel til atmosfæren og dermed til endringer i relativ fuktighet. I tillegg vil slike endringer i sirkulasjonsmønster kunne føre til endringer i vertikal stabilitet, slik at utfellingsraten av «potensiell vannmengde» vil kunne endres. Hvorvidt Clausius-Clapeyron-likningen kan benyttes for norske forhold må eventuelt undersøkes basert på empiriske data. Tilsvarende gjelder for metode 2 (*empirisk justering*) som også benytter Clausius-Clapeyron-likningen. I tillegg baserer metode 2 seg på svært usikre relasjoner mellom endringer i temperatur og antall dager med nedbør. På bakgrunn av usikkerheten knyttet til Clausius-Clapeyron-likningen og behov for lokale empiriske relasjoner, er metode 1 og 2 vurdert som mindre egnet for estimering av klimafaktorer.

Metode 3 (*stokastiske værgeneratorer*) er ikke utprøvd for norske forhold, og det er derfor vanskelig å vurdere hvorvidt den kan gi nyttige klimafaktorer for korte varigheter. Det finnes flere ulike stokastiske værgeneratorer og de værgeneratorer som er benyttet for Danmark er nødvendigvis ikke anvendbare for norske forhold. Tilsvarende eksisterer det ulike kaskade-modeller for nedskalering i tid, noe som resulterer i mange kombinasjoner med hensyn til metode-tilnærming. Ett sannsynlig utfall ved benyttelse av denne metoden er at det må utvikles en egen værgenerator for Norge. I tillegg må det vurderes hvilken kaskade-modell som er best egnet til nedskalering. Ett viktig moment med metode 3 er at den forutsetter lokaliteter med tilstrekkelig IVF-statistikk. I Norge er det relativt sett få målestasjoner med lange kortidsnedbørserier. Dette kan bidra til å gjøre anvendelsen av metoden noe begrenset for Norge.

Metode 4 (*analogt utvalg av historisk data*) forutsetter at det eksisterer en tilstrekkelig mengde lokale data som representerer fremtidens klima. For de fleste lokaliteter vil det knapt nok eksistere tilstrekkelig data som beskriver dagens klima. Metode 5 (*analogt klimaområde*) forutsetter at det eksisterer analoge klimaområder for Norge, noe som virker usikkert da det norske klimaet er generelt mer variert enn det danske klimaet hvor metode 5 har blitt benyttet. Det er store geografiske forskjeller i nedbørforhold i Norge (se Figur 5 og Figur 8 i Vedlegg 3), og det er med Norges kompliserte topografi derfor lite sannsynlig at det eksisterer analoge klimaområder som vil kunne representere det fremtidige klima over hele landet.

Metode 6 (*døgnnedbør fra RCM*) representerer den enkleste form for nedskalering av døgnverdier fra regionale klimamodeller. Metoden har imidlertid en betydelig svakhet i at den tenderer til å underestimere klimafaktorer for nedbørintensiteter med kortere varighet enn 24 timer. Basert på denne egenskapen er metode 6 vurdert som mindre egnet for estimering av klimafaktorer.

Metode 7 (*direkte fra RCM*) benytter simulerte verdier for timesnedbør fra regionale klimamodeller direkte til å estimere klimafaktorer. Fordelen med denne metoden er at den ikke er avhengig av lange lokale historiske kortidsnedbørserier. Hvis lange historiske tidsserier foreligger kan imidlertid dette med fordel utnyttes gjennom utvidede analyser slik som det ble utført av Nilsen et al. (2011), slik at klimafaktorer med kortere varighet enn 1 time også kan estimeres. Samtidig er det diskutabelt hvor vidt resultater fra regionale klimamodeller kan benyttes til å beregne klimafaktorer direkte.

6 anbefalinger og forslag til videre arbeid

Basert på gjennomgangen i denne rapporten vurderes det mest hensiktsmessig å benytte metode 7 (*direkte fra RCM*) for estimering av klimafaktorer for Norge. Anvendelsen av denne metoden forutsett utført av institusjon og/eller etat med tilstrekkelig og relevant kjennskap til regionale klimamodeller. Videre forutsettes det at EURO-CORDEX-resultatene for Norge må verifiseres mot observasjoner, og fortrinnsvis post-prosesserer/bias-justeres for å justere for systematiske feil og gi bedre lokal oppløsning enn 11 x 11 km². Dersom modellenes reproduksjon av dagens klima er akseptabel, kan disse simuleringene brukes til å gi klimafaktor for ulike utslippsscenarioer (RCPer), ulike tidshorisonter (2021-2050 og 2071-2100), ulike årstider, og ulike varigheter ned til 1 evt. 3 timer. Selv om metoden i utgangspunktet vil estimere klimafaktorer for timesverdier kan en tilleggs-analyse, tilsvarende den som ble utført for Oslo av Nilsen et al. (2011), benyttes til å estimere klimafaktorer for varigheter også under 1 time. Dette forutsetter imidlertid god kvalitet på IVF-statistikken. Der dette ikke foreligger vil det evt. kunne være mulig å benytte forholdstall som angitt i Figur 4 i Vedlegg 2.

I tillegg til Metode 7 bemerkes det at det vil være interessant også å undersøke metode 4 (*stokastiske værgeneratorer*) for norske forhold. Hvorvidt metode 4 vil gi realistiske estimater av endringer i korttidsnedbør vil avhenge av hvor godt inngangsdataene fanger opp de fysiske forhold som påvirker endringer i nedbørintensitet.

For alle metodene gjennomgått i rapporten er det knyttet stor usikkerhet til estimater av klimafaktorer. For å få ett bilde av usikkerheten er det derfor hensiktsmessig å beregne klimafaktorer vha. flere beregningsmetoder. En slik tilnærming er benyttet i danske studier hvor det gjennom flere metoder er beregnet midlere verdi og standardavvik for klimafaktorer (Arnbjerg-Nielsen, 2008; Gregersen, 2014; Gregersen, et al., 2014). En mulig tilnærming for Norge vil derfor kunne være å benytte metode 7 (*direkte fra RCM*) for hele Norge, samt metode 4 (*stokastiske værgeneratorer*) på utvalgte lokaliteter. Resultatene vil kunne sammenliknes med svært forenklede tilnærminger som, for eksempel metode 1 (*Clausius-Clapeyron-likningen*), som vil kunne gjennomføres uten særlig ressursbehov. Forskjellene mellom beregnede klimafaktorer vil gi en indikasjon på usikkerhetene ved estimatene.

Ett poeng ved metode 7 er at klimafaktorer vil være beregnet ut i fra den økningen som forventes i fremtiden i forhold til en referanse/normalperiode. Denne normalperioden vil for eksempel kunne være 1961-1990. Ofte vil IVF-statistikken tilknyttet lokaliteten omfatte data fra en annen periode enn normalperioden. Dette medfører at klimafaktorer ikke kan benyttes direkte på IVF-statistikken. Generelt, hvis en nasjonal klimafaktor benyttes på IVF-statistikk bestående av ett nyere datagrunnlag enn normalperioden vil intensiteten kunne bli overestimert da endringer i nedbørintensiteter allerede har blitt observert i tiden etter normalperioden. Ved en fremtidig fastsetting av klimafaktorer for Norge basert på metode 7, bør det derfor presiseres hvilket datagrunnlag faktorene skal benyttes for, og hvordan én eventuelt justerer klimafaktoren hvis IVF-statistikken ikke representerer normalperioden.

7 Referanser

- Arnbjerg-Nielsen, K. 2008.** *Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems.* s.l. : 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008, 2008.
- Arnbjerg-Nielsen, Karsten. 2008.** *Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer.* s.l. : IDA Spildevandskomiteen, Skrift nr. 29, 2008.
- . **2006.** *Klimaeffektens betydning for ekstremregn og dermed funktionen af afløbssystemer - litteraturstudie.* s.l. : Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 9, 2006. ISBN 87-7052-001-1, 2006.
- Berndtsson, R. og Niemczynowicz, J. 1988.** *Spatial and temporal scales in rainfall analysis - some aspects and future perspectives.* s.l. : Journal of Hydrology, 1988.
- Burton, A. , et al. 2008.** *RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system.* s.l. : Environmental Modelling & Software, 2008.
- City of London. 2011.** *Minutes of the Municipal Council Meeting, July 25, 2011, pp. 33.* s.l. : Ontario:<http://council.london.ca/meetings/Council%20Minutes/2011-07-25%20Minutes/Council%20Minutes.pdf>, 2011.
- Gregersen, I.B. 2014.** *Past, present, and future variations of extreme precipitation in Denmark.* s.l. : Department of Environmental Engineering, DTU, 2014.
- Gregersen, I.B., et al. 2014.** *Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter.* s.l. : IDA Spildevandskomiteen, Skrift nr. 30, 2014.
- Hallegatte, S., Hourcade, J. og Ambrosi, P. 2007.** *Using Climate Analogues for Assessing Climate Change Economic Impacts in Urban Areas.* s.l. : Climatic Change, 2007.
- Hanssen-Bauer, I., et al. 2009.** *Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing.* Oslo : Norsk klimasenter, september 2009, 2009.
- IPCC. 2007.** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* 2007.
- . **2013.** *Climate Change 2013 The Physical Basis.* s.l. : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013.
- Jernbaneverket. 2014.** *Teknisk regelverk, Underbygning/Prosjektering og bygging/Drenering.* [Internett] 11 November 2014.
https://trv.jbv.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Drenering.
- Kristiansand kommune. 2014.** *Overvannsveileder for Kristiansand kommune.* s.l. : Teknisk ingeniørvestenet, 2014.
- Lenderink, G. og van Meijgaard, E. 2008.** *Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes.* s.l. : Nature Geoscience, 2008.
- Lindholm, Oddvar, et al. 2008.** *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering, Norsk Vann Rapport 162.* 2008. Rapport 162-2008.
- Ministry for the Environment. 2008.** *Climate Change Effects and Impacts Assessment - A guidance manual for local government in New Zealand - 2nd edition.* s.l. : Ministry for the Environment, New Zealand, 2008.
- . **2010.** *Tools for estimating the effects of climate change on flood flow: A guidance manual for local government in New Zealand.* s.l. : Woods, R. Mullan, A.B. Smart, G. Rouse, H. Hollis, M. McKerchar, A. Ibbitt, R. Dean, S. Collins, D. (NIWA), 2010.
- Nilsen, V. 2008.** *Urban drainage in the face of climate change - adaption of regional climate model output for rainfall-runoff simulations in Oslo, Norway.* s.l. : Masteroppgave, NMBU, 2008.
- Nilsen, V., et al. 2011.** *Analysing urban floods and combined sewer overflows in a changing climate.* s.l. : Journal of Water and Climate Change, 2011.
- Norsk Vann. 2012.** *Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem.* s.l. : Rapport 193, 2012.
- Olsson, J, et al. 2009.** *Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City.* s.l. : Atmospheric Research (Volume 92, Issue 3), 2009.

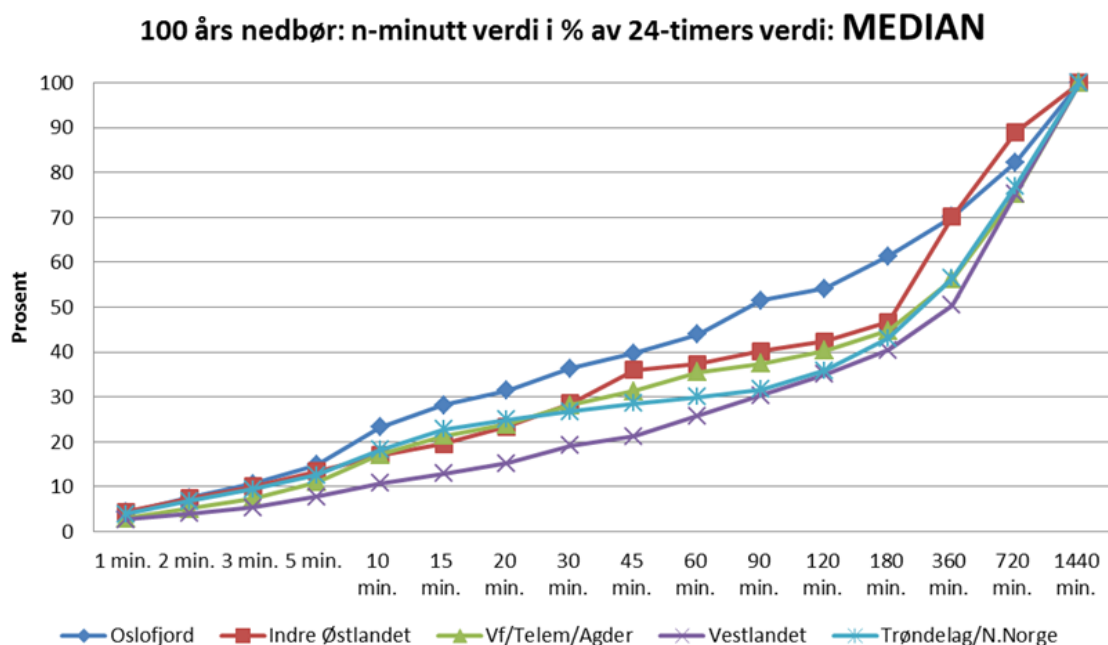
- Peck, A., Prodanovic, P. og Simonovic, S.P. 2012.** *Rainfall Intensity Duration Frequency Curves Under Climate Change: City of London, Ontario, Canada.* s.l. : Canadian Water Resources Journal, 2012.
- Rodriguez, R., et al. 2014.** *Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain).* s.l. : International Journal of Climatology, 2014.
- Sansom, J og Renwick, J.A. 2007.** *Climate change scenarios for New Zealand rainfall.* s.l. : Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007.
- Semadeni-Davies, A., et al. 2008.** *The impacts of climate change and urbanization on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater.* s.l. : Journal of Hydrology, 2008.
- Skaugen, T.E. og Førland, E.J. 2011.** *Future changes in extreme precipitation estimated in Norwegian catchments.* s.l. : Meteorologisk institutt rapport nr. 13/2011, 2011.
- Statens vegvesen. 2014.** *Håndbok N200 Vegbygging.* s.l. : Vegdirektoratet, 2014.
- Svensk Vatten. 2011.** *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem.* s.l. : Svensk Vatten Publikation P104, 2011.
- . **2011.** *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem.* s.l. : Svenskt Vatten AB, Rapport P104, 2011.
- Westra, S., et al. 2014.** *Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall.* s.l. : Reviews of Geophysics, 2014.

Vedlegg 1 Metoder for beregning av klimafaktor

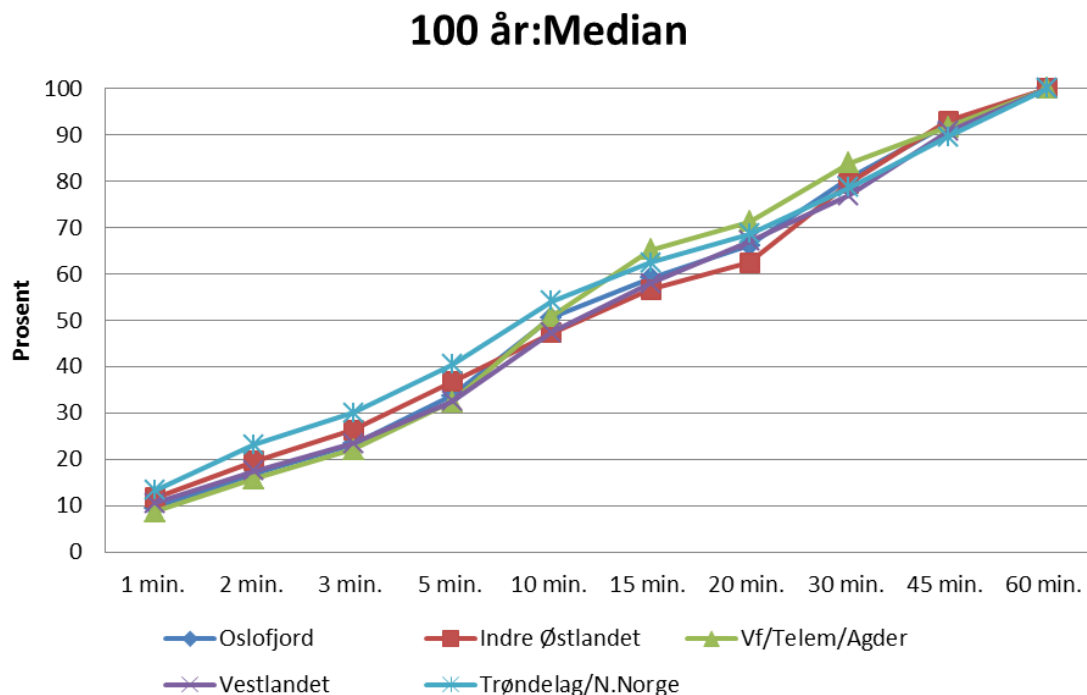
Metode	Beskrivelse	Styrker	Svakheter	Databehov (historiske)	Databehov (framskrivninger)
Metode 1: Clausius-Clapeyron-likningen	Enkel tilnærming til estimering av klimafaktorer som benytter Clausius-Clapeyron-forholdet og forventede temperatur-endringer til å angi andelen vann som kan holdes i atmosfæren.	Svært enkel metode som kan utføres av personell uten spesiell kompetanse. Estimater kan raskt oppdateres når nye temperatur-framskrivninger foreligger fra regionale klimamodeller.	Det er knyttet stor usikkerhet til bruk av Clausius-Clapeyron-forholdet, spesielt mht. sensitivitet for endringer i værtyper, relativ fuktighet og storskala sirkulasjonsmønstre. Flere studier indikerer at utviklingen i nedbørintensitet vil overstige det som beregnes via Clausius-Clapeyron-forholdet.	Lokal IVF-statistikk.	Regional utvikling i temperatur .
Metode 2: Empirisk justering	Metoden benytter midlere månedsverdier for forventet endring i nedbørmengde og temperatur til å beregne hvordan antall dager med nedbør endres og videre hvordan verdier for døggnedbør vil endre seg. Antall dager med nedbør beregnes ut i fra framskrivninger for lufttemperatur og empiriske relasjoner. Clausius-Clapeyron-likningen definerer øvre grense for hvor mye nedbør som vil kunne falle i løpet 24 timer.	Kan gjennomføres ved hjelp av manuell beregning og er derfor svært enkel i bruk. Ved tilfredsstillende empirisk relasjon mellom nedbørdager og temperatur er nødvendig datagrunnlag beskjedent.	Metoden har en åpenbar svakhet i at den kun estimerer klimafaktorer for døggnedbør samt at den avhenger av lokale empiriske relasjoner. Metoden benytter også Clausius-Clapeyron-forholdet for beregning av maksimal nedbør og har derfor tilsvarende svakheter som Metode 1.	Lokale midlere månedsverdier for temperatur og nedbør og lokale empiriske sammenhenger mellom temperatur og antall dager med nedbør.	Regional utvikling av månedlige verdier for temperatur og nedbør.
Metode 3: Stokastiske værgeneratorer	En stokastisk værgenerator er en statistisk empirisk modell som simulerer dataserier for klimatologiske parametere som nedbør, temperatur, stråling og vind. Modellen kalibreres først mot historiske data og deretter justeres modellen etter simulerte tidsserier for fremtidig klima fra en klimamodell.	Ivaretar klimafaktorens variasjon mht. varighet. Har tidligere blitt benyttet gjennom flere studier for å beregne klimafaktorer for IVF-statistikk.	Usikkerheten knyttet til estimater er i stor grad avhengig av kvaliteten på det historiske datagrunnlaget modellen er kalibrert mot. Krever derfor IVF-statistikk med god kvalitet. Komplisert metode som krever spesiell kompetanse for utførelse.	Lokal IVF-statistikk med relativt lange tidsserier.	Døgnverdier for nedbørintensitet fra regional klimamodell.

Metode 4: Analogt utvalg av historiske data	Metoden baserer seg på utvalgelse av en periode med historiske nedbørintensiteter hvor klimaet har de egenskapene som forventes å være representativt for fremtiden. Dette kan for eksempel være observerte nedbørintensiteter for varme år.	Metoden er svært enkel og man kan velge ut et større antall analoge perioder hvis det eksisterer lange tidsserier. Metoden vil gi nedbørintensiteter med høy tidsoppløsning.	Metoden forutsetter at det eksisterer en tilstrekkelig mengde lokale data som representerer fremtidens klima. Det eksisterer også ulike metoder for utvalgelse av analoge perioder og metoden er derfor subjektiv.	Lokal IVF-statistikk med så lange dataserier at et representativt utvalg av analoge perioder kan foretas.	Generell utvikling av nedbørmengde og temperatur.
Metode 5: Analogt klimaområde	Metoden benytter et analogt klimaområde for å estimere framskrivninger i nedbørintensiteter for en annen lokalitet. Et analogt klimaområde er et område, eller region, hvor klimaet i dag tilsvarer det som forventes å gjelde for lokaliteten i fremtiden. Klimafaktorer kan evt. beregnes ved å sammenlikne ekstremhendelser i det analoge klimaområdet med ekstremhendelser for lokaliteten.	Metoden gir mulighet for å bestemme dimensjonerende regnhendelser med høy tidsoppløsning uten historiske data på lokalt nivå.	Begrenset utvalg av analoge klimaområder og sannsynligvis ikke tilstrekkelig antall og/eller variasjon som vil kunne dekke hele Norge. Per definisjon en subjektiv metode ettersom det finnes ulike måter å bestemme det analoge klimaområde.	IVF-statistikk og generelle klimatologiske parametere fra analogt klimaområde.	Generell utvikling av lokale nedbørmengde og temperatur.
Metode 6: Døgnnedbør fra RCM	Enkel metode som forutsetter at variasjonene i nedbørintensiteter med varighet under 24 timer forblir uendret i fremtiden. Dette tilsvarer en antagelse om at klimafaktoren i likning 3 er uavhengig av varigheten.	Svært enkel å anvende da data allerede foreligger.	Stor usikkerhet knyttet til antagelsen om at klimafaktoren er uavhengig av varigheten. Basert på rapportert litteratur vil metoden gi en systematisk underestimering av fremtidig nedbørintensitet.	Lokal IVF-statistikk.	Døgnverdier for nedbørintensitet fra regional klimamodell
Metode 7: Klimafaktorer fra regionale klimamodeller	Metoden benytter EURO-CORDEX resultatene når disse er kvalitetssikret. Resultatene må først verifiseres mot observasjoner og fortrinnsvis etterarbeides (bias-justeres) for å justere for systematiske feil og for å gi en bedre romlig oppløsning.	Metoden vil kunne gi klimafaktor for nedbørintensiteter for varigheter ned til 1 time, for ulike utslippsscenarier, ulike framskrivnings-perioder og årstider. I liten grad avhengig av lokal IVF-statistikk med lang varighet.	Usikkerhet knyttet til beskrivelse av ekstremnedbør i modellene. Komplisert metode som krever spesiell kompetanse for utførelse.	Lokal IVF-statistikk.	Timesverdier for nedbørintensitet fra regional klimamodell

Vedlegg 2: Påregnelig 100-års nedbør for ulike varigheter i prosent av nedbør med 24 og 1 time varighet



Figur 3: Påregnelig 100-års nedbør for ulike varigheter i prosent av 24-timers nedbør



Figur 4: Påregnelig 100-års nedbør for ulike varigheter i prosent av 1-times nedbør

Vedlegg 3: Bakgrunn fra Meteorologisk Institutt