

Samfunnsøkonomisk analyse av sjablongmessige krav til fordøyning av overvann

*Av Kim H. Paus, Stig S. Høylye, Stian L. Bjørnsen, Vegard Nilsen,
Lars-Gunnar Nordheim, Torbjørn Friborg*

Kim H. Paus er førsteamanuensis ved NMBU.

Stig S. Høylye er sivilingeniør for VA i Sweco Norge AS.

Stian L. Bjørnsen er sivilingeniør for VA i Sweco Norge AS.

Vegard Nilsen (Ph.D.) er post. doc. ved NMBU.

Lars-Gunnar Nordheim er sivilingeniør for VA i Sweco Norge AS.

Torbjørn Friborg er sivilingeniør for VA i Sweco Norge AS.

Summary

Socio-economic analysis of stormwater detention using standardized design. Municipalities set standardized design criteria (e.g., return period of 20 years) for urban stormwater detention on private properties as a mean to prevent damage downstream. The study assesses whether standardized design criteria can be justified from a socio-economic perspective and explores different criteria-models to increase profitability. Model results from a combined hydraulics/cost model for Nadderud in Bærum have been analyzed and Monte Carlo simulations performed over a period of 100 years. The results show that, for a business as usual scenario, the expected annual damage cost due to stormwater runoff will increase by more than 500% when the climate factor is increased by 50 % from 1.0 to 1.5. Nevertheless, due to high costs of measures, it is not profitable to reduce damage costs via standard design criteria. To increase profitability, design criteria for measures must be assessed separately for individual development projects. If standard design criteria are to be used, the highest profitability will be achieved at approximately 2-year return period provided

that the measure has a long life-expectancy, unit prices below NOK 2,000/m³ and/or a multi-functionality that can justify the investment.

Sammendrag

For å forebygge mot overvannsskader stiller kommuner i dag sjablongmessige krav til at urbant overvann skal håndteres lokalt på egen eiendom (f.eks. ved nedbør med gjentakingsintervall på 20 år). Artikkelen vurderer om sjablongmessige krav kan forsvares ut ifra et samfunnsøkonomisk perspektiv, og utforsker ulike krav-modeller for å øke lønnsomheten. Modellresultater fra en kombinert hydraulikk/skadekostnadsmodell for Nadderud i Bærum er analysert og Monte Carlo simuleringer utført for å vurdere lønnsomheten over en periode på 100 år. Resultatene viser at forventet årlig skadekostnad som følge av overvann vil øke med over 500 % når klimafaktoren økes med 50 % fra 1,0 til 1,5 hvis forebyggende ikke tiltak etableres. Som følge av høye enhetspriser på tiltak er det imidlertid lite lønnsomt å forebygge via sjablongmessige krav til tiltak. For å øke lønnsomheten må krav til tiltak vurderes individuelt

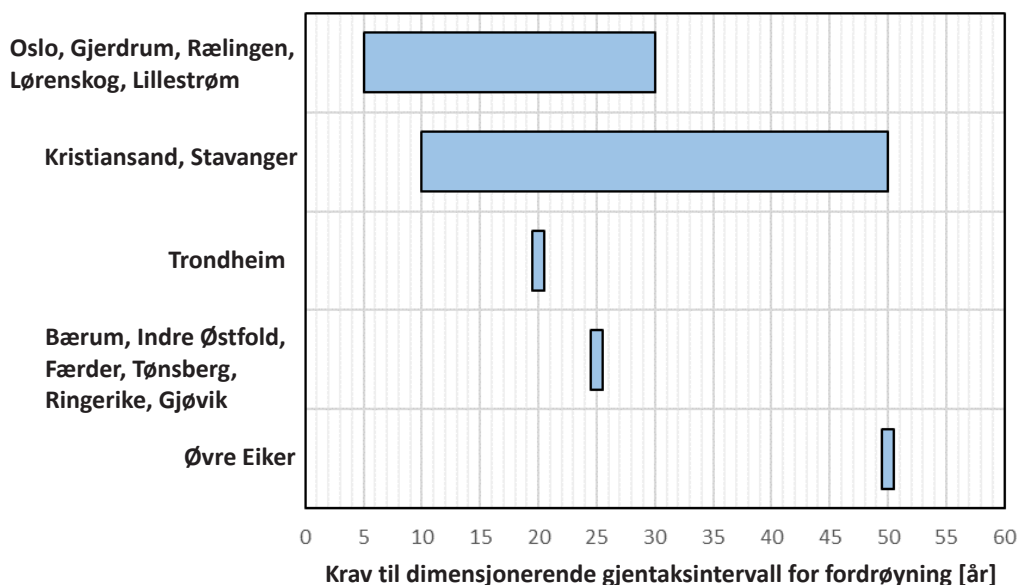
for den enkelte utbygging. Skal sjablongmessige krav benyttes viser resultatene at høyest lønnsomhet oppnås ved å dimensjonere for 2 års regn under forutsetning av at tiltaket har lang forventet levetid, enhetspriser under 2 000 NOK/m³ og/eller en flerfunksjonalitet som kan forsvare investeringen.

Innledning

Klimaendringer, fortetting og et aldrende kommunalt ledningsanlegg fører til at stadig mer overvann kommer på avveie og gjør skader på infrastruktur og bygninger. For å imøtekomme utfordringene stiller kommuner krav til at overvann ved ny bebyggelse skal fordrøyes på egen eiendom (lokal overvannshåndtering). Hovedformålet med fordrøyning er å avlaste kommunalt avløpsanlegg eller vassdrag. En vanlig tolkning av kravet er at nedbøren med et bestemt gjentakintervall og klimafaktor skal holdes tilbake på egen eiendom og at videreført vannføring ikke skal overgå en maksimal verdi (dvs. et maksimalt påslipp til offentlig avløpsanlegg eller utløp til vassdrag). Fordrøyning av overvann lokalt utgjør trinn 2 i tre-trinnsstrategien jfr. Norsk Vann rapport nr. 162 *Veiledning i*

klimatilpasset overvannshåndtering (Lindholm m.fl., 2008). I veilederen gis det anbefalinger til minimumsverdier for dimensjonerende gjentakintervall for separat- og fellesavløpssystem (fra 10 til 30 år) men ingen tilsvarende anbefaling av minimumsverdier for dimensjonerende gjentakintervall for lokal fordrøyning. Veilederen gir imidlertid et eksempel på retningslinjer til kommuneplanens arealdel der det gis krav om at en 1-års flom skal fordrøyes lokalt.

Generelt vil det optimale dimensjonerende gjentakintervall for fordrøyning være det som gir høyest lønnsomhet over tid når alle kostnader og ulemper medregnes (Endresen, 2008). I tillegg bør også eventuelle nytteverdier vurderes. Det er imidlertid sjeldent at økonomiske aspekter vurderes i denne sammenheng og i dag er det vanlig praksis å benytte sjablongverdier for dimensjonerende gjentakintervall. Figur 1 oppsummerer krav til gjentakintervall i overvannsveiledere i noen utvalgte kommuner og viser at gjentakintervall typisk er basert på minimumsanbefalingene for dimensjonering av separat- og fellesavløpssystem i Norsk Vann rapport nr. 162.



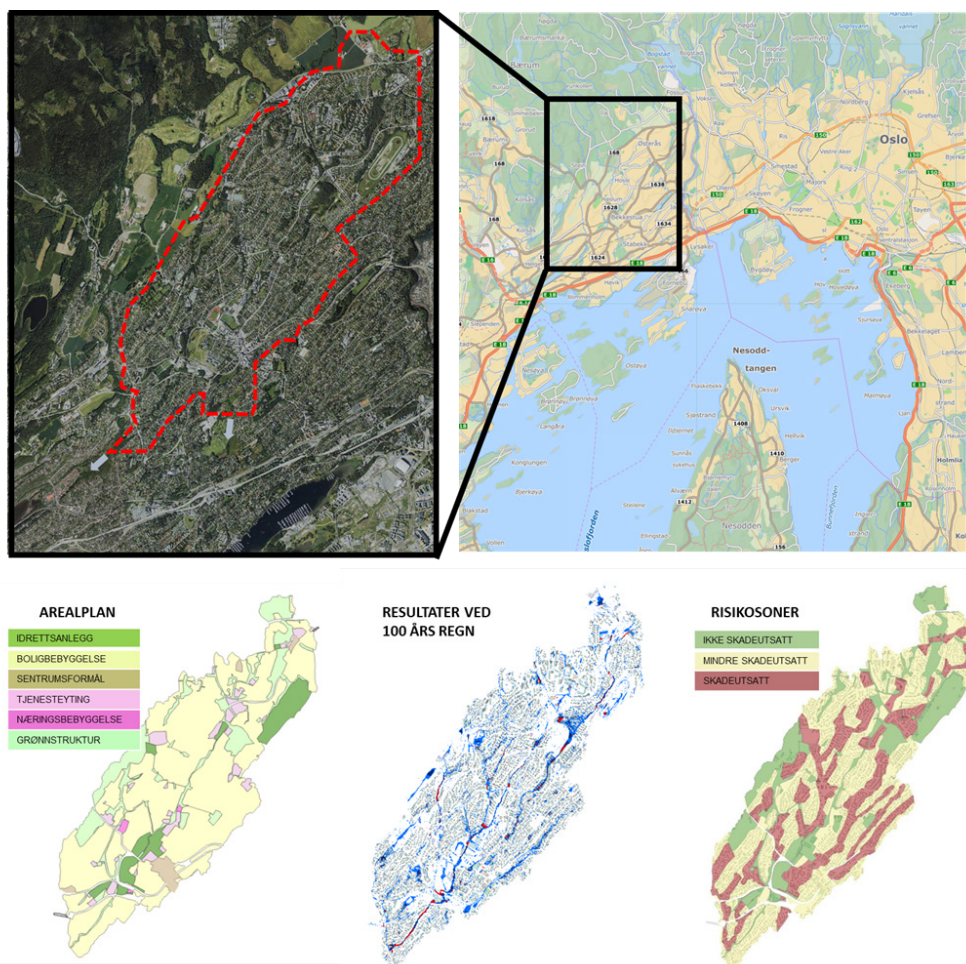
Figur 1. Utvalg av kommunale krav til dimensjonerende gjentakintervall for beregning av nødvendig fordrøyningsvolum på egen tomt ved ny bebyggelse. Klimafaktor benyttes i tillegg.

Selv om bruk av sjablongmessige krav gir forutsigbarhet i plan- og byggesaker, er det naturlig å stille spørsmål ved lønnsomheten til dagens praksis når alle kostnader og ulemper medregnes over et lengre perspektiv. Formålet med artikkelen er derfor å undersøke om sjablongmessige krav til lokal fordroyning kan forsvares samfunnsøkonomisk. Videre er det utforsket tre krav-modeller for hvordan sjablong-verdier kan settes med hensikt å øke lønnsomhet. Beregninger er utført for et case-område på Nadderud i Bærum kommune og artikkelen er basert på resultater fra tre masteroppgaver ved NMBU (Nordheim, 2019, Bjørnsen, 2020, Høylye, 2021).

Metode

Beskrivelse av case-området

Case-området befinner seg på Nadderud, Bærum kommune og har en utstrekning på 808 ha (Figur 2). Basert på kommuneplanen preges området av boligbebyggelse (ca. 70 %) med innslag av grøntområder (ca. 15 %), idrettsanlegg (ca. 7 %) og arealer for tjenesteyting (ca. 5 %). Området har et overordnet fall mot sørvest. Avrenning fra nordvestre del av området dreneres ut via Nadderudbekken til Øverlandselva mens avrenning fra områdene i østre del drenerer til Stabekken som er en del av Stabæk-vassdraget.



Figur 2. Oversiktskart over analyseområdet på Nadderud, Bærum kommune (pilene angir feltutløp) samt kommunal arealplan, resultater ved 100 års regn og risikosoner (se beskrivelse i metode).

Kombinert modell for hydrologi, hydraulikk og kostnader

Den hydrauliske modellen for området ble utviklet i 2017 og oppdatert i 2019 av Sweco Norge (Friborg m.fl., 2020). Modellen er koblet slik at overvann tillattes å renne fra terreng til ledningsnett og vice versa hvis ledningsnettet er under trykk. Ledningsnettmodellen, konstruert av Rosim AS i 2016, er basert på data fra Gemini VA og inneholder ikke gate- og grøftesluk, ledningsnett eller fordryningsanlegg som ikke er i kommunalt eie. Overflatemodellen er basert på terrengdata fra 2018. Bruer og gangbare kulverter er manuelt åpnet i modellen.

Nordheim (2019) videreutviklet modellen for å også simulere forventede skadekostnader som følge av ekstremnedbør. Skadekostnadsmodellen beregner forventede skadekostnader for ulike bygningskategorier som funksjon av overvannsflommens dybde (minimum 10 cm) og plassering (rundt minst 60 % av en bygning). Både den hydrauliske modellen og skadekostnadsmodellen ble kalibrert for en ekstremnedbørhendelse 6.august 2016 der skadekostnaden i case-området ble estimert å være 28 MNOK (Nordheim, 2019).

Vurdering av lønnsomhet

Den kombinerte modellen ble benyttet til å undersøke sammenhengen mellom ulike krav til fordryning og lønnsomhet. Kostnader tilknyttet både skader og tiltak ble beregnet over en periode på 100 år. I det videre er det oppsummert metode for hvordan fordryningstiltak ble modellert samt hvordan totalkostnader ble beregnet.

Nedbør-scenarier

Nedbør-scenariene som inngikk i simuleringene omfattet symmetriske blokkhyetogram med varighet på 180 min, blokkopløsning på 5 min og gjentakintervall på 2, 5, 10, 20, 50, 100 og 1000 år (statistikk fra stasjon Øvrevoll SN19510). 1000 års nedbøren ble beregnet ved ekstrapolasjon. Nedbør-scenarier med varierende klimafaktor ble indirekte simulert ved å endre gjentakintervallet for nedbøren. Eksempelvis

kan det beregnes at et 2 års regn med klimafaktor 1,30 har samme nedbørmengde som et 5 års regn i dagens klima. Ved simulering av kostnader over en periode på 100 år ble en midlere klimafaktor på 1,3 benyttet.

Modellering av fordryningstiltak

Lokale fordryningstiltak ble simulert ved å redusere nedbørmengden som treffer lokalt (Figur 3). Eksempelvis, i en situasjon der et regn på 64 mm treffer en eiendom med et tiltak dimensjonert for 42 mm nedbør så vil de første 42 mm fjernes fra hyetogrammet mens 22 mm vil potensielt generere avrenning avhengig av lokal infiltrasjonsevne (antatt fra 0 til 72 mm/t avhengig av overflatetype og løsmasse-sammen-setning). For samme tiltak vil ikke en nedbørmengde på 15 mm generere avrenning. Tilnærmingen er en åpenbar forenkling av de hydrologiske prosesser som vil foregå i typiske fordryningstiltak som grønne tak, regnbed og magasiner, men også en nødvendig tilnærming når store områder skal analyseres. I tillegg ble utløp fra tiltak ila. regnhendelsen neglisjert. Det ble utført simuleringer med fordryningstiltak dimensjonert for nedbørmengder fra 0 til 47 mm, der øverste verdi tilsvare et 20 års regn med klimafaktor 1,3.

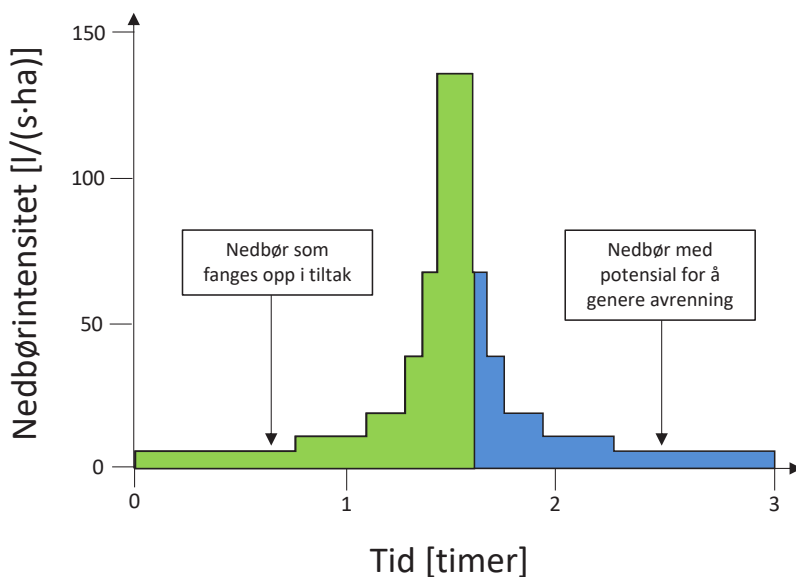
I virkeligheten vil etablering av lokale tiltak for fordryning skje sporadisk og hovedsakelig ifm. ny bebyggelse. Ettersom en slik etappevis og ukjent utvikling av tiltak vil være svært usikker, ble det antatt en simultan utbygging av området. Slik vil resultatene fra modellen representere fremtidsscenarioer der alle eiendommer har etablert tiltak for fordryning basert på ulike krav til dimensjonering (fra 0 til 47 mm).

Modellering av kostnader

Totalkostnad for en enkelt simulering ble beregnet som følgende:

$$K_{tot} = K_{skader} + K_{tiltak} \quad (1)$$

Der K_{skader} og K_{tiltak} er kostnader som følge av henholdsvis skader og etablering, drift og vedlikehold av tiltak for fordryning over 100 år [MNOK].



Figur 3. Tiltak ble modellert ved å fjerne de første mm av nedbørhyetogrammet. Verdiene i figuren er for 200 års regn (64 mm for tre timer varighet) og tiltak dimensjonert for et 10 års regn (42 mm for tre timer varighet).

Forventet årlig skadekostnad ble beregnet som følgende (Rosbjerg, 2017):

$$EAD = \int_{T_{min}}^{T_{maks}} \frac{D(T)}{T^2} dT \quad (2)$$

Der EAD (Expected Annual Damage) er forventet årlig skade [MNOK/år], T_{maks} er det laveste gjentakintervallet som medfører skadekostnader (antatt å være 2 år), T_{min} er det høyeste gjentakintervallet som inngår i vurderingen (10 000 år) [år] og D er skadekostnaden som funksjon av gjentakintervall T beregnet via skadekostnadsmodellen [MNOK]. Integralet i likning (2) ble løst numerisk via trapesmetoden som har vist seg å være en tilstrekkelig god tilnærming for å estimere forventet årlig skadekostnad (Olsen m.fl., 2015).

Forventede årlige skadekostnader fra skadekostnadsmodellen omfatter ikke kostnadsdrivende hendelser utover bygningsskader. For å ivareta kostnader for øvrige hendelser som trafikkforstyrrelser, overløpsdrift og forurensning, skader på gater, veier, parker etc. ble skadekostnadene fra skadekostnadsmodellen multiplisert med en påslagsfaktor. Det bemerkes at påslagsfaktoren i virkeligheten vil kunne ha

en avhengighet til gjentakintervall. Videre ble likning (2) multiplisert med nåverdifaktor for å beregne kostnader i nåverdi:

$$K_{skader} = F_p \cdot R \cdot EAD \quad (3)$$

$$R = \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n} \quad (4)$$

Der F_p er påslagsfaktoren [-], R er nåverdifaktoren [-], r er diskonteringsrenten [%] og n er antall år.

Kostnader tilknyttet tiltak ble beregnet som følgende:

$$K_{tiltak} = P_{dim} \cdot A \cdot (I_e \cdot F_R + R \cdot I_d) \quad (5)$$

Der P_{dim} er dimensjonerende regn for tiltaket [m], A er summen av areal for de eendommer som skal håndtere overvann lokalt [m²], I_e er investeringskostnaden ved etablering av tiltak [NOK/m³], R er nåverdifaktoren [-], I_d er årlige kostnader som følge av drift og vedlikehold av tiltaket [NOK/(m³ · år)] og F_R er en reduksjonsfaktor [-].

Argumentet for å inkludere en reduksjonsfaktor i likning (5) er at enhetsprisen på tiltak må forventes å minke med økende dimensjoner (jfr. kvantumsrabatt).

Krav-modeller

Tre alternative modeller til sjablongmessige krav ble vurdert:

1. *Flat modell:* Alle bebygde arealer får samme krav til tiltak. Grøntområder, grav og urnelund er unntatt krav.
2. *Boligbasert modell:* Alle boligområder får samme krav til tiltak. Andre arealkategorier jfr. Figur 2 er unntatt krav.
3. *Risikobasert modell:* Krav deles i tre avhengig av hvilken risikokategori arealet har. Risiko-soner og -kategorier er vist i Figur 2 og er basert på modellresultater for et 100 års regn. Røde soner omfatter

bebygde arealer mindre enn 20 meter fra stor vannføring/vanndybder, grønne soner omfatter grøntstruktur og idrettsanlegg og gule soner omfatter øvrige arealer.

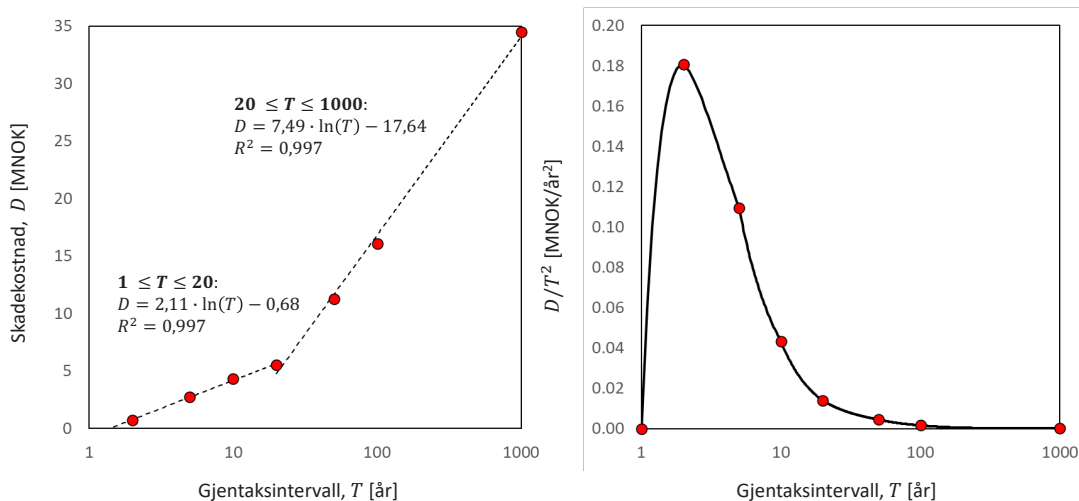
Hensikten med å vurdere modellene var å undersøke om andre tilnærminger enn å benytte minimumsverdier for dimensjonerende gjen-taksintervall i Norsk Vann rapport nr. 162 vil øke lønnsomheten.

Monte Carlo simuleringer

Som vist i likning (3) og (5) krever modellering av kostnader at man tar stilling til mange verdier som det er knyttet stor usikkerhet til. For å til-nærme seg usikkerheten ved inngangsverdiene ble det utført Monte Carlo simuleringer for vari-erende inngangsverdier jfr. Tabell 1.

Tabell 1. Verdier og fordelinger benyttet i Monte Carlo simuleringer.

Beskrivelse	Antakelser
Påslagsfaktor (F_p) Faktor som multipliseres med skadekostnader fra skadekostnadsmodell for å ivareta de øvrige skadekostnader modellen ikke hensyntar. I NOU (2015) gjennomgås det to eksempler der fordelingen mellom direkte og indirekte skadekostnader er beregnet. Basert på fordelingen kan påslagsfaktorene estimeres til å være anslagsvis 2 (flom i Gudbrandsdalen) og 4,5 (Frida for Nedre Eiker kommune). Som diskutert av Olesen m.fl. (2017) er det stor usikkerhet knyttet til fordelingen og det er derfor valgt et relativt stort intervall.	Gjennomsnitt: 4 Minimum: 2 Maksimum: 6 Fordeling: uniform
Diskonteringsrente (r) Risikojustert avkastningskrav som benyttes for å beregne nåverdi av fremtidige kontantstrømmer. I NOU (2012) anbefales 2 % etter 75 år.	Gjennomsnitt: 2,0 % Minimum: 0,5 % Maksimum: 3,5 % Fordeling: uniform
Kostnad ved etablering av tiltak (I_e) Engangskostnad for etablering av tiltak med antatt levetid på 100 år. Basert på enhetspriser for fordrøyningsanlegg (Magnussen m.fl., 2015, Hernes, 2018, Paus og Egeberg, 2020).	Gjennomsnitt: 5 300 Standardavvik: 3 300 Fordeling: lognormal
Kostnader ved drift og vedlikehold av tiltak (I_d) Basert på rapporterte verdier (Magnussen m.fl., 2015, Paus og Egeberg, 2020). Laveste verdi er valgt som 0 da det kan argumenteres for at etablering av tiltak vil gi tilsvarende reduksjon for behov for drift og vedlikehold av avløpsanlegg.	Gjennomsnitt: 25 Minimum: 0 Maksimum: 50 Fordeling: uniform
Reduksjon i enhetspriser (f_R) Det er antatt en lineær synkende verdi for reduksjonsfaktoren beskrevet av følgende likning: $F_R = 1 - \frac{P_{dim}}{P_{maks}} \cdot f_r$ Der P_{maks} er største dimensjonerende regn på 47 mm og f_r er reduksjonen i enhetspriser [%]. Basert på prisede fordrøyningsanlegg av Hernes (2018) kan reduksjonen i enhetspriser forventes å være om lag 50 til 70 % når tiltaksvolumet øker med det tidoblede.	Gjennomsnitt: 60 % Minimum: 50 % Maksimum: 70 % Fordeling: uniform



Figur 4. Skadekostnader (uten påslag) som funksjon av gjentakintervall (venstre) i situasjonen uten tiltak og D/T^2 som grunnlag for å beregne forventet årlig skadekostnader (høyre).

Resultater og diskusjon

Skadefunksjonen og påvirkning av klimaendringer

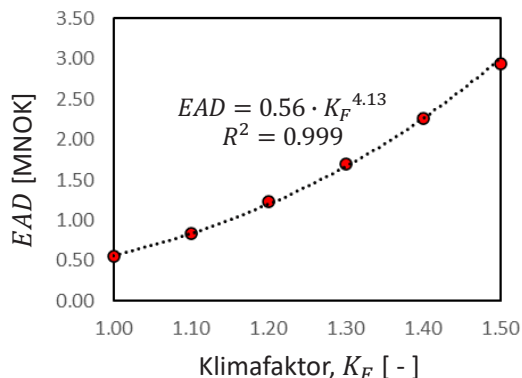
Figur 4 viser skadekostnad som funksjon av gjentakintervall for Nadderud samt grunnlaget for beregning av forventet årlig kostnad. Plotting av skadekostnad per regnhendelse viser en tydelig økning i skadekostnaden ved ca. 20 års gjentakintervall (Figur 4; venstre). Tilsvarende økning ved 10 til 20 års gjentakintervall har blitt rapportert tidligere for Odense og Aarhus i Danmark (Olsen m.fl., 2015). En mulig forklaring på dette skiftet relaterer seg til kapasiteten til avløpsanlegget som typisk dimensjoneres for gjentakintervall på 10 til 20 år. Regnhendelser større enn det avløpsanlegget kan håndtere vil dermed resultere i økt vann på avveie og større skader. Ved beregning av D/T^2 (Figur 4; høyre) er skiftet i stigningstall ved gjentakintervall på 20 år inkludert, noe som gir en tilsynelatende god kurvetilpasning.

Forventet årlig skadekostnad (EAD) ble beregnet for klimafaktorer (K_F) fra 1,0 til 1,5. Som vist i Figur 5 har klimafaktoren stor påvirkning på EAD og en kurvetilpasning viser at skadekostnaden øker med klimafaktoren i fjerde potens. Det betyr at EAD vil øke med over 500 % når klimafaktoren økes fra 1,0 til 1,5. For dagens klima ble EAD for Nadderud estimert å være

0,55 MNOK/år. Det er åpenbart utfordrende å validere verdien, men en sammenlikning med årlig registrerte skadekostnader samt EAD -estimer for andre områder viser at verdien er innen et forventet intervall. Eksempelvis kan det estimeres en EAD på 0,69 MNOK/år ved å ta gjennomsnitt av Bærum kommunes registrerte skadekostnader perioden 2008 til 2018 (Nordheim, 2019) og nedskalere skadekostnadene mht. case-området utbredelse og antall bygninger. At EAD -verdiene er i samme størrelsesomfang styrker modellens troverdighet. Samtidig er det knyttet betydelig usikkerhet til EAD basert på registrerte skader da perioden er kort (11 år) og også dominert av en 200 års hendelse (6. august 2016). For to boligområder i Odense og Aarhus i Danmark beregnet Olsen m.fl. (2015) EAD -verdier på henholdsvis 203 000 og 51 400 EUR/år. Tilsvarende beregnet Jamali m.fl. (2020) EAD for et boligområdet i Melbourne, Australia på 0,30 Millioner AUD\$/år. Ved å hensynta prisstigning og valutakurser er det estimert at EAD -verdiene normalisert for areal i de nevnte studiene varierer fra ca. 1 200 til 7 000 NOK/(år-ha). For Nadderud er EAD normalisert for areal beregnet fra 690 til 4 140 NOK/(år-ha) avhengig av hvilken påslagsfaktor som legges til grunn (jfr. Tabell 1).

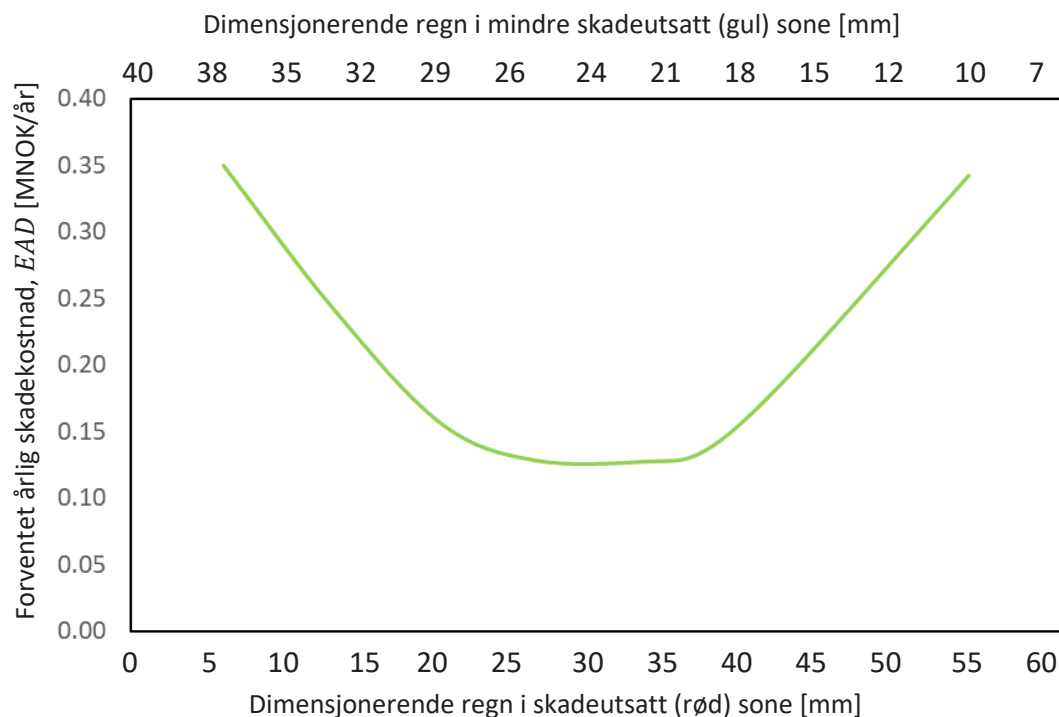
Forventede årlige skadekostnader (EAD) for de tre krav-modellene

Mens dimensjonerende regn (P_{dim}) vil være fordelt geografisk likt i både den flate og den boligbaserte modellen, så vil den risikobaserte modellen tillate at P_{dim} varierer med hvor skadeutsatt arealet antas å være. For arealer i

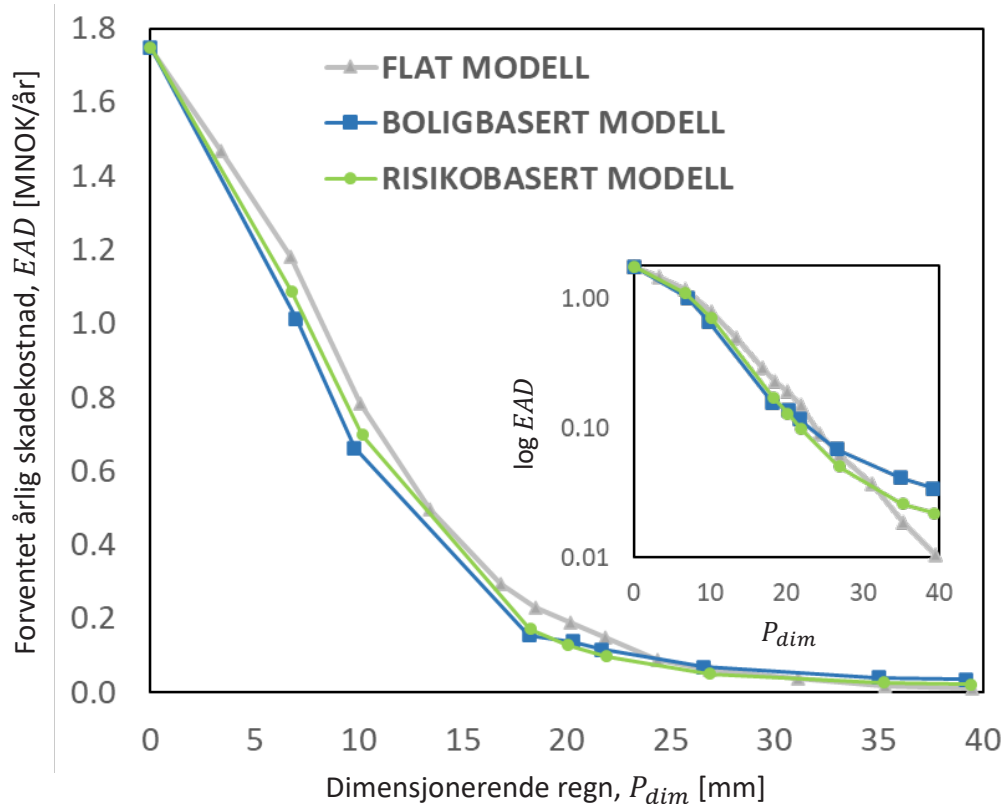


Figur 5. Forventet årlig skadekostnad (EAD) i en situasjon uten tiltak som funksjon av klimafaktor.

grønne soner (ikke skadeutsatt) er det antatt unødvendig med tiltak og P_{dim} settes her til 0. For arealer i gule (mindre skadeutsatt) og rød soner (skadeutsatt) vil det kunne finnes en optimal fordeling av P_{dim} som gir lavest EAD. For å tilnærme seg den optimale fordelingen er det i Figur 6 beregnet EAD for ulike fordelinger av P_{dim} i henholdsvis gul og rød sone, for en situasjon der samlet fordrøyningsvolum er holdt konstant ($P_{dim} = 26 \text{ mm}$). Resultatet viser at det finnes en tilsynelatende optimal fordeling (lavest EAD) når P_{dim} i gul sone utgjør ca. 80 % av P_{dim} i rød sone. Når det er stor forskjell mellom verdier for P_{dim} i sonene blir trolig fordrøynings tiltak enten under- eller overdimensjonerte. Samtidig viser resultatet at det ikke er tilstrekkelig å fordrøye overvannet i rød sone alene, men at også andre mindre skadeutsatte områder må fordrøye overvannet for at skadekostnadene skal minimeres.



Figur 6. Forventet årlig skadekostnad (uten påslag) for risikobasert modell versus dimensjonerende regn i områder som er skadeutsatt (rød sone) og mindre skadeutsatt (gul sone). Alle EAD-verdier er beregnet for et gjennomsnittlig dimensjonerende regn i case-området på 26 mm.



Figur 7. Forventede årlige skadekostnader (EAD) som funksjon av dimensjonerende regn for henholdsvis flat, boligbasert og risikobasert modell (uten påslag). Det er benyttet en klimafaktor på 1,30 i beregning. Figuren viser også EAD på logaritmisk skala for å synliggjøre forskjellene mellom modellene.

I Figur 7 er beregnet EAD som funksjon av økende P_{dim} for de tre krav-modellene. I den risikobaserte modellen er P_{dim} i gul sone ca. 80 % av P_{dim} i rød sone. Resultatene viser at det er tilsynelatende kun marginale forskjeller mellom modellene, og alle følger til en viss grad en invers S-kurve. Det betyr EAD at synker raskest (altså at tiltak har høyest effekt) når P_{dim} er mellom 6 og 10 mm. Deretter avtar effekten og allerede ved P_{dim} på 24 mm er EAD redusert med ca. 90 %. Videre avtar effekten ytterligere før endelig EAD går mot null ved P_{dim} på 47 mm (99 % reduksjon for den flate modellen). Med andre ord vil skadekostnader som følge av overvann være tilnærmet lik 0 i en situasjon der alle eiendommer i case-området har dimensjonert for en regnhendelse med gjentakintervall på 20 år og klimafaktor 1,30. Resultatene viser også at

den flate modellen har en noe høyere EAD-verdi enn de to andre modellene ved $P_{dim} > 30$ mm. Dette betyr at for hver etablerte enhet fordryningsvolum vil skadereduksjonen være høyest om en av de to andre modellene benyttes. Videre krysser den flate modellen de andre modellene når . Dette kan forklares med at det er arealer i både den boligbaserte og den risikobaserte modellen som ikke har krav om tiltak, og dermed heller aldri vil kunne redusere skadene lokalt.

Samfunnsøkonomisk analyse av modellene

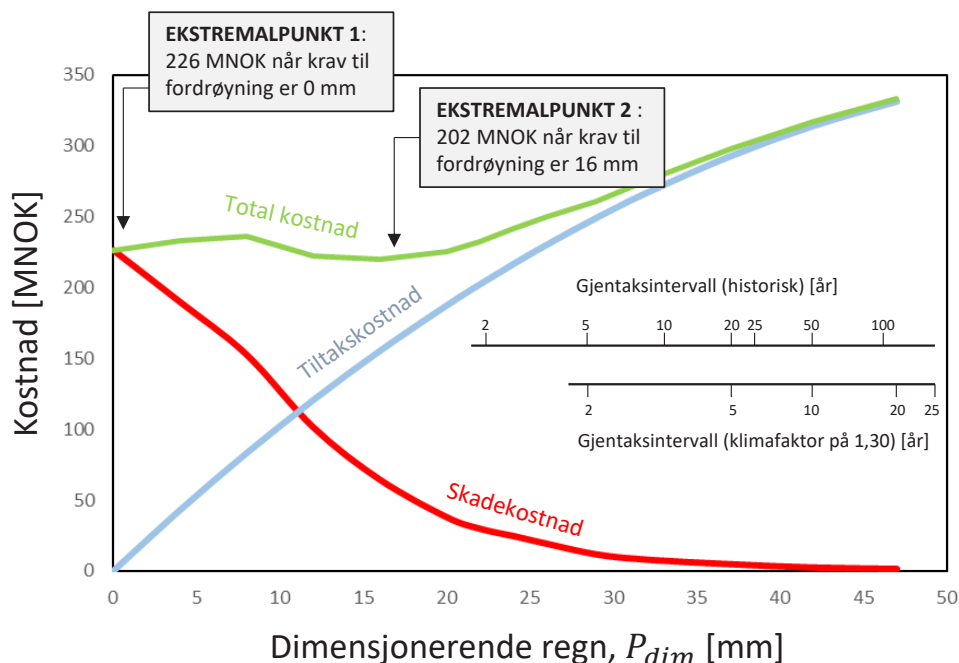
Kurvene for de tre modellene i Figur 7 er benyttet sammen med likning (1-5) til å beregne nåverdi av totalkostnaden for varierende verdier for P_{dim} . Et eksempel på en enkelt simulering er vist i Figur 8 (flat modell). I eksempelet har

kurven for totalkostnad to ekstremalpunkter og det optimale punktet ligger der alle fordrøyningstiltak dimensjoneres for $P_{dim} = 16$ mm. Det er imidlertid marginal forskjell mellom ekstremalpunktene hva det gjelder totalkostnad, og etablering av tiltak med $P_{dim} = 16$ mm vil redusere de totale kostandene med beskjedne 3 % når en sammenlikner med en situasjon uten tiltak ($P_{dim} = 0$). Figur 8 viser videre at den optimale verdien for P_{dim} ligger lavere enn det som tilsvarer et 2 års regn uten klimafaktor. Dagens praksis med å sette krav til å dimensjonere fordrøyningstiltak for et 20 års regn (47 mm med klimafaktor 1,30 for regnvarighet på 180 minutter) vil i eksempelet faktisk gi den minst lønnsomme situasjonen. Dette fordi tiltakskostandene fortsetter å øke når P_{dim} øker mens skadekostnader allerede ligger nær null ved $P_{dim} = 45$ mm. Årsaken til at vi får to ekstremalpunkter i Figur 8 er videre todelt. For det første er det etter $P_{dim} = 10$ mm tiltakene har høyest

effekt (jfr. Figur 7). I tillegg medfører reduksjonsfaktoren (jfr. Tabell 1) at enhetsprisene for tiltak er høyest for tiltak dimensjonert for lave verdier av P_{dim} .

Verdiene i Figur 8 er gjeldende for de spesifikke forutsetninger som fremgår i figurteksten og antar blant annet en relativt lav tiltakskostnad på 1000 NOK/m³. Om tiltakskostnaden i eksempelet øker til det dobbelte mens andre verdier bevares, vil tiltakskostnadene stige så mye at den totale kostnadskurven aldri vil ha et optimalpunkt. Med andre ord vil det under slike forutsetninger ikke være lønnsomt å etablere tiltak i case-området men heller akseptere skadekostnadene.

For å analysere et større utfallsrom av modellene ble det gjennomført Monte Carlo simuleringer. Figur 9 viser sannsynlighetsfordelingene av totalkostnader for de tre modellene (med optimal verdi av P_{dim}). Sannsynlighetsfordelingene for scenariene uten tiltak og der tiltak



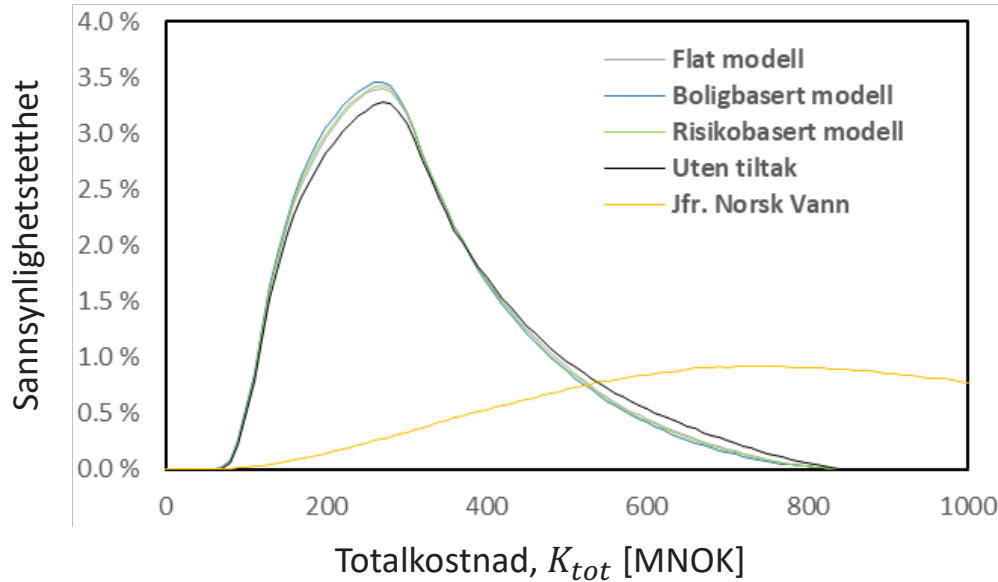
Figur 8. Fordeling av totale kostnader (skadekostnader og tiltakskostnader) over 100 år for varierende krav til dimensjonerende regn for fordrøyning i en situasjon der alle får samme krav (flat modell). Forutsetningene bak beregningene er en påslagsfaktor på 3, diskonteringsrente på 2 %, tiltakskostnad på 1000 NOK/m³, årlige kostnader på drift og vedlikehold på 15 NOK/(m³·år), reduksjon i enhetspriser på 60 % og 100-års levetid på tiltak.

dimensjoneres etter minimumsverdier for separat og fellessystem iht. Norsk Vann rapport nr. 162, er vist som referanser. Resultatene er videre oppsummert i Tabell 2. Gjenspeilet av de marginale forskjellene mellom de tre modellenes skadefunksjoner (jfr. Figur 7), er det ingen betydelige forskjeller i sannsynlighetsfordelingene.

For kun et fåtall av simuleringene (11,5 til 15,4 %; Tabell 2) ble det funnet at etablering av tiltak ($P_{dim} > 0$) ga høyest lønnsomhet. Dette er årsaken til at sannsynlighetsfordelingene langt på vei sammenfaller med tilnærmingen uten tiltak. Sannsynlighetsfordelingen der tiltak dimensjoneres etter Norsk Vann sine mini-

Tabell 2. Resultater fra Monte Carlo simulering (106 simuleringer) for ulike tilnærminger og modeller. For minimumsverdier jfr. Norsk Vann rapport nr. 162 tilsvare nedbørmengdene gjentakintervall på 5 år (37 mm), 10 år (42 mm) og 20 år (47 mm) med regnvarighet på 180 minutter og klimafaktor 1,30.

Alternativ	P_{dim}	Totalt fordrøyningsvolum	Midlere (median) totalkostnad	Andel simuleringer der $P_{dim} > 0$	Midlere enhetspris når $P_{dim} > 0$
Uten tiltak	0 mm	0 m³/ha	324 (296) MNOK	-	-
Minimumsverdier jfr. Norsk Vann rapport nr. 162	37 mm (idrettsanlegg) 42 mm (boligbebyggelse) 47 mm (sentrum/næring)	353 m³/ha	1043 (918) MNOK	-	-
Flat modell	Variierende (0 – 47 mm)	Variierende (0 – 394 m³/ha)	315 (290) MNOK	11,5 %	1 888 NOK/m³
Boligbasert modell	Variierende (0 – 47 mm)	Variierende (0 – 394 m³/ha)	310 (286) MNOK	15,4 %	2 070 NOK/m³
Risikobasert modell	Variierende (0 – 47 mm)	Variierende (0 – 394 m³/ha)	313 (289) MNOK	12,2 %	1 933 NOK/m³



Figur 9. Resultater fra Monte Carlo simulering (106 simuleringer) viser sannsynlighetstettheten av totalkostnader over 100 år for ulike modeller og tilnærminger.

mumsverdier skiller seg betydelig fra de øvrige, og vil klart være den minst lønnsomme tilnærmingen. Midlere total kostnad for denne tilnærmingen er over 3 ganger så høy som tilnærmingen uten tiltak.

Forutsetninger for lønnsom forebygging av ekstremnedbør

I simuleringene der tiltak lønner seg er optimal i de tre modellene beregnet å være mellom 16 til 20 mm i 80 % av tilfellene. Dette tilsvarer et dimensjonerende regn med gjentakintervall i underkant av 2 år (uten klimafaktor) og resulterer i et totalt fordrøyningsvolum i området fra 130 til 170 m³/ha. Som det fremkommer i Tabell 2 har dette utvalget av simuleringer en midlere enhetspris på tiltak fra 1 888 til 2 070 NOK/m³, noe som er betydelig lavere enn gjennomsnittet for alle simuleringene (5 300 NOK/m³). Til sammenlikning varierer rapporterte enhetspriser for fordrøyningsanlegg fra om lag 2 000 til opp mot 33 000 NOK/m³ (Magnussen m.fl., 2015, Hernes, 2018, Paus og Egeberg, 2020). Skal sjablonmessige krav til lokal fordrøyning være samfunnsøkonomisk lønnsomt må altså enhetsprisene holdes lave. I praksis betyr det at man i økt grad må etterstrebe tiltak med både lang levetid og flerfunksjonalitet. Det forventes at tiltak med flere funksjoner (f.eks. nedsenket ballbinge, parkeringsplass eller torg hvor fordrøyning kan tillates ved ekstremnedbør) vil ha langt høyere kost-nytte-effekt enn tiltak som bare anlegges for å fordøye overvann. I tillegg vil en ved etablering av naturbaserte tiltak også kunne forsvare høyere enhetspriser da slike tiltak vil kunne gi ytterligere merverdier (f.eks. økt biologisk mangfold, beskyttelse av vannkvalitet, reduksjon av fremmedvann, gjenbruk av vann, rekreasjonsmuligheter og estetikk).

Under en generell antakelse om at fordrøyningstiltak har potensial til å redusere overvannsskader vil lønnsomheten øke hvis krav til tiltak er forankret i de lokale utfordringene. Resultatene i Tabell 2 viser at en krav-modell basert på en overordnet vurdering av områdets skaderisiko ikke gir et tilstrekkelig nivå i så måte. Kommuner bør derfor basere krav til for-

drøyning i det enkelte utbyggingsprosjekt på resultater fra detaljerte risikoanalyser der både overflatehydrologi og ledningshydraulikk vurderes. I den sammenheng må også krav til fordrøyning vurderes opp mot status på nedstrøms flomvei (trinn 3 i tre-trinnsstrategien) samt konsekvenser av utløpsmengder på terreng, til vassdrag og/eller kommunalt avløpsanlegg. I studier der det er funnet at tiltak er lønnsomt er tiltak typisk plassert der hydrauliske analyser antyder at tiltak har stor effekt (Oslo kommune, 2016, Haugård, 2017, Haugård m.fl., 2018), og altså ikke etter en flat modell. I Australia finnes det riktignok eksempel på at etablering av regntønner etter en flat modell vil kunne være lønnsomt (Jamali m.fl., 2020), men dette forutsetter både et beskjedent krav til tiltak (3,4 mm = 34 m³/ha) samt reduksjon av vannforbruk via gjenbruk av regnvannet. Generelt er det en oppfatning av at den norske tilnærmingen til lokale fordrøyningskrav skiller seg fra utenlandsk praksis. En tilnærming som går igjen internasjonalt er å kreve at fordrøyningstiltak dimensjoneres slik at naturlig avrenning opprettholdes for flere gjentakintervall, f.eks. fra 2 til 100 år (Government of Ontario, 2003, NJDEP, 2020) og/eller 1 til 5 års regn (Butler og Davies, 2004). Til sammenlikning dimensjoneres norske fordrøyningstiltak etter et begrenset påslipp til offentlig avløpsanlegg (typisk 10 til 20 l/(s·ha)) uavhengig av gjentakintervall. Forutsatt at resultatene på Nadderud, Bærum har overføringsverdi til andre områder resulterer denne tilnærmingen i tiltakskostnader som ikke kan forsvares ut ifra et samfunnsøkonomisk perspektiv.

Oppsummering og konklusjoner

Resultatene i dette studiet viser at det er lav sannsynlighet for at dagens sjablongmessige krav for fordrøyning av overvann er en lønnsom tilnærming for Nadderud i et lengre perspektiv. Årsaken er at de sparte skadekostnadene ved å øke tiltaksstørrelse ikke kan forsvares av tilhørende økning i tiltakskostnader. Skal sjablongmessige krav benyttes viser resultatene at størst lønnsomhet oppnås når fordrøynings-

tiltak dimensjoneres for et gjentakintervall på ca. 2 år (uten klimafaktor). Det forutsettes da at tiltak har enhetspriser under 2 000 NOK/m³ og forventet lang levetid (100 år). Tiltakets flerkompleksjonalitet og merverdi som vil kunne oppnås ved bruk av f.eks. naturbaserte løsninger, bør imidlertid sees i sammenheng med tiltakskostnadene. Resultatene antyder videre at krav til fordrøyning i det enkelte utbyggingsprosjekt bør reflektere forventet reduksjon i skadekostnader. Dette vil kunne kreve analyser som for mange kommuner vil være ressurskrevende og forutsetter normalt etablering, kalibrering og validering av modeller for overvann. En slik ressursøkning bør imidlertid kunne forsvares ut fra de forventede kostnadene samfunnet påføres ved å benytte sjablongmessige krav. I det videre er det naturlig å utforske overførbarheten fra området på Nadderud til andre områder, samt teste ut andre krav-modeller og hvilket detaljeringsnivå på hydrauliske analyser som er nødvendig for å øke lønnsomheten.

Referanser

Bjørnsen, S.L. (2020) Optimal tiltaksstørrelse for lokal overvannshåndtering – Samfunnsøkonomisk vurdering av case-område på Nadderud, Bærum. Masteroppgave, NMBU.

Butler, D. og Davies, J.W. (2004) Urban Drainage, Spon Press.

Endresen, S. (2008) Overvann. Valg av dimensjonerende gjentakintervall, VA/Miljø-blad nr. 85, Stiftelsen VA/Miljø-blad.

Friborg, T., Solum, M.U., Achton-Boel, A., Nordheim, L.-G. og Claudius, J.I. (2020) Skybruddsmasterplan Nadderud, Oppdragsrapport av SWECO for Bærum kommune.

Government of Ontario (2003) Stormwater Management Planning and Design Manual, Environmental design criteria (3.0), Ontario Ministry of the Environment.

Haugård, P.Å. (2017) Analyse av lønnsomhet for overvannstiltak – En casestudie av avløpsnett ved Grefsen, Oslo kommune. Masteroppgave, NMBU.

Haugård, P.Å.S., Lindholm, O.G., Nilsen, V. og Kvitsjøen, J. (2018). Metode for valg av kostnadseffektive overvannstiltak i et endret klima. Vann 4.

Hernes, R.R. (2018) Kostnader ved lokale overvannstiltak. Fordypningsprosjekt, NTNU.

Høylye, S.S. (2021) Samfunnsøkonomisk vurdering av lokal fordrøyning av overvann og dimensjonerende nedbør : en case-studie i Bærum kommune. Masteroppgave, NMBU.

Jamali, B., Bach, P.M. og Deletica, A. (2020). Rainwater harvesting for urban flood management – An integrated modelling framework. Water Research 171.

Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sæggrov, S., Jakobsen, G. og Aaby, L. (2008) Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering, Norsk Vann rapport 162.

Magnussen, K., Wingstedt, A., Rasmussen, I. og Reinvang, R. (2015) Kostnader og nytte ved overvannstiltak, Vista Analyse og COWI, oppdragsrapport for Miljødirektoratet, Rapport nummer M305/2015.

NJDEP (2020) New Jersey Administrative Code, Chapter 8 - Stormwater Management (§§ 7:8-1.1 — 7:8-6.3), New Jersey Department of Environmental Protection.

Nordheim, L.-G. (2019) Utvikling av en kost-nyttmodell basert på urban flommodellering og FKB-data. Masteroppgave, NMBU.

NOU (2012) Norges offentlige utredninger 2012: 16: Samfunnsøkonomiske analyser, Finansdepartementet.

NOU (2015) Norges offentlige utredninger 2015: 16: Overvann i byer og tettsteder - Som problem og ressurs, Klima- og miljødepartementet.

Olesen, L., Löwe, R. og Arnbjerg-Nielsen, K. (2017) Flood damage assessment – Literature review and recommended procedure, Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities.

Olsen, A.S., Zhou, Q., Linde, J.J. og Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. Water 7(1), 255-270.

Oslo kommune (2016) Hovedrapport - Handlingsplan for overvannshåndtering i Oslo kommune.

Paus, K.H. og Egeberg, J.R. (2020) Evaluering av kostnader og nytte ved et utvalg av blågrønne overvannstiltak, Asplan Viak oppdragsrapport for Statsbygg.

Rosbjerg, D. (2017). Optimal adaptation to extreme rainfalls in current and future climate. Water Resources Research 53(1), 535-543.