



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Utvikling av en kost-nyttmodell basert på urban flommodellering og FKB-data

Development of a cost-benefit model based on
urban flood modeling and FKB-data

Lars-Gunnar Nordheim
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven representerer mitt avsluttende arbeid på Vann- og Miljøteknikk ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet. Oppgaven ble utarbeidet i tidsrommet mellom januar og mai 2019 av undertegnede. Det har vært en krevende prosess å utvikle en modell som inkorporer metodikk innenfor programmering, vannfag og økonomi, men også et spennende, lærerikt og givende arbeid.

Jeg ønsker å rette en stor takk til Sweco, Bærum kommune og DHI for tilgang på prosjektmateriell og nødvendige lisenser som har vært brukt i oppgaven. Videre ønsker jeg å takke veilederne mine gjennom denne oppgaven, Vegard Nilsen og Torbjørn Friborg, som da jeg måtte bytte oppgave i desember var raske på banen med idéer og hjelp til å finne en ny oppgave. I tillegg ønsker jeg å takke for gode diskusjoner og hjelp gjennom oppgaven.

Avslutningsvis ønsker jeg å takke venner og familie for all støtte gjennom skrivearbeidet.

Ås, Mai 2019

Lars-Gunnar Nordheim

Sammendrag

Skadelige nedbørshendelser i urbane områder har de siste årene fått økt oppmerksomhet. Bare de siste ti årene har nedbørhendelser i Eiker, Asker og Bærum gitt skader på over 400 millioner kroner. Situasjonen er lik i Sverige og Danmark, som også har opplevd ekstreme nedbørhendelser. Det regnes at hyppigheten i nedbørstilfeller også vil øke ytterligere fremover. Som følge av dette har skadelige nedbørhendelser blitt en del av agendaen til beslutningstagere rundt om i landets kommuner. Det tenkes mye nytt rundt løsninger og tiltak for å mitigere skadepotensialet til nedbørhendelser, men det er ofte usikkert hvilke av løsningene som gir beste resultat til rimeligste krone. Denne oppgaven presenterer en kost-nyttmodell, basert på resultater fra flommodellering, som kan hjelpe beslutningstagere å gjøre de riktige og mest lønnsomme valgene av tiltak mot skadelige nedbørhendelser.

Kost-nyttmodellen er bygget på flomresultater fra modellering, samt tilgjengelig kartdata. På denne måten kan flomutsatte hus, veier og lignende automatisk kvantifiseres, slik at en kostnad raskt kan beregnes. I denne oppgaven ble det tatt utgangspunkt i et område i Bærum kommune, hvor Sweco Norge hadde utviklet en flommodell. Ved hjelp av flomresultatene herfra kunne kost-nyttmodellen kalibreres og testes.

Det ble funnet at kost-nyttmodellen klarer å kvantifisere flomutsatte bygninger på en tilfredsstillende måte, samtidig som det må utføres ytterligere arbeid med å inkludere flere kostnadstyper. Dette gjelder spesielt kostnader knyttet til tidstap, som kan være en betydelig andel av totalkostnaden. Først når et mer helhetlig bilde av kostnadene er representert i modellen vil den være fullkommen nok til å kunne brukes i beslutnings-sammenheng. Arbeidet med oppgaven viste også at en hyppig benyttet antagelse rundt skadekostnaden ved nedbørshendelser må brukes med omhu, da nedbørhendelser viser seg å være svært kompliserte å karakterisere med en enkel parameter.

Summary

In recent years, harmful precipitation in urban areas have received increased attention. Only in the last ten years, precipitation incidents in Eiker, Asker and Bærum have caused damage of more than NOK 400 million. The situation is similar in Sweden and Denmark, which have also experienced extreme precipitation events. It is considered that the frequency of harmful precipitation will increase further in coming years. As a result, harmful precipitation incidents have become part of the agenda of decision makers around the country's municipalities. There are ongoing discussions about solutions and measures to mitigate the damage potential of precipitation incidents, but it is often uncertain which of the solutions yield the best results, for the least amount of money spent. This paper presents a cost-benefit model, based on results from flood modeling, that can help decision makers make the correct and most profitable decisions against harmful precipitation events.

The cost-benefit model is based on results from urban flood modeling, as well as available geographic data, with the goal of automatically quantifying flood-exposed houses, roads and the like. By using this data a cost related to the damage caused could quickly be determined. The area of interest in this thesis was situated in Bærum municipality, where Sweco Norway had developed a flood model. The results from said flood model were used to calibrate and test the cost-benefit model.

It was found that the cost-benefit model manages to quantify flood-prone buildings in a satisfactory manner, at the same time further work must be done to include different cost categories. This applies in particular to costs related to time loss, which can be a significant portion of the total cost. Only when a more comprehensive picture of the costs is represented in the model, will it be good enough to be used in real life applications. Finally it was showed that a frequently used assumption about the damage cost of precipitation events must be used with care, as damage caused by precipitation events prove to be very complicated to characterize with a single parameter.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
Innhold	vii
Figurer	xiii
Tabeller	xvi
Forkortelser	xvii
1 Introduksjon	1
1.1 Motivasjon og problemstilling	1
1.2 Relatert arbeid	2
1.3 Struktur	2
2 Bakgrunn	3
2.1 Grunnleggende om overvann	3
2.1.1 Nedbørskarakteristikk	3
2.1.2 Nedbørtap og effektiv nedbør	5
2.1.3 Overflatekarakteristikk	8
2.2 Geografiske informasjonssystemer	9
2.2.1 Felles Kartdatabase	9
2.2.2 Vektor- og rasterdata	9
2.3 Modellering av urbane pluviale flommer	10
2.3.1 Ikke-stasjonær strømning	10
2.3.2 Ledningsmodell	12
2.3.3 Overflatemodell	12
2.3.4 Databehov og usikkerhet	12
2.4 Kost-nytteanalyse ved urbane pluviale flommer	16
2.4.1 Formål	16
2.4.2 Kostnader	17
2.4.3 Nytte	18
2.4.4 Diskonteringsrente	20

2.4.5	Usikkerhet	21
3	Metode	23
3.1	Introduksjon	23
3.2	Modelleringsområde	23
3.3	MIKE FLOOD-modellen	24
3.3.1	Teoretisk rammeverk	25
3.3.2	Grunnlagsdata	26
3.3.3	Kalibrering	26
3.3.4	Usikkerhetsmomenter	27
3.4	Kost-nyttemodell	27
3.4.1	Programvare	28
3.4.2	Grunnlagsdata	28
3.4.3	Kostnad og sårbarhetsdata	29
3.4.4	Beregningsmetodikk	31
3.4.5	Kalibreringsparametere	36
3.4.6	Fremtidig kostnad	37
3.4.7	Nytteberegning	38
4	Resultater	41
4.1	Bakgrunnsdata fra modelleringsområdet og Bærum kommune	41
4.2	Flomutbredelse ved ulike gjentakintervall	43
4.3	Følsomhetsanalyse	45
4.3.1	Nødvendig antall iterasjoner i Monte Carlo-analysen	45
4.3.2	Antall flomutsatte bygninger ved ulike D_{skade}	46
4.3.3	Effekten av andelsparameteren ϕ , ved $D_{skade} = 0.1$	46
4.3.4	Kostnadsfordeling mellom ulike bygningstyper	48
4.3.5	Kostnadsfordeling mellom ulike gjentakintervall	48
4.4	Kost-nytte: regnet sjetten august	49
4.4.1	Valg av modellparametere og beregningsmetode	49
4.4.2	Definering av skadefunksjonen $DF(T)$	51
4.4.3	Forventet årlig skade	51
4.4.4	Fremtidig skade og eksempel på nytteberegning	52
5	Diskusjon	55
5.1	Flommodellen	55
5.2	Følsomhetsanalyse	56
5.2.1	Antall iterasjoner og trekningen av parametere	56
5.2.2	Kalibreringsparametere D_{skade} og ϕ	56
5.2.3	Kostnadsfordelinger	58

5.3	Kost-nytte: regnet sjetten august	59
5.3.1	Skadefunksjon og forventet årlig skade	59
5.3.2	Eksempel på nytteberegning	60
5.4	Generelle betraktninger	61
5.4.1	Manglende kostnadsdata	61
5.4.2	Log-lineær sammenheng mellom skade og gjentaksintervall	62
6	Konklusjon	65
6.1	Videre arbeid	66
	Referanser	67
	Vedlegg A Beregningsmetoder i Python-skriptet	71
A.1	RasterCBA	71
A.2	Inititate_”object”	72
A.3	MonteCarloCostCalc	72
	Vedlegg B Kostnad- og sårbarhetstall	73
	Vedlegg C Flommodelleringsresultater	75

Figurer

2.1	Grafisk fremstilling av forskjellene mellom nettverk av irregulære trekanter (venstre) og rasterceller (høyre)	14
2.2	Prinsippet bak å benytte enkelte av datasettene til kalibrering, og enkelte til validering av kalibreringen	15
2.3	Skadefunksjonen 2.8 plottet med lineær x-akse og log x-akse. a og b er satt til henholdsvis 10000 og 50000 for å demonstrere forskyvningseffekten de har	18
2.4	Antatt form på $\frac{DF(T)}{T^2}$ plottet mot logaritmisk T, tegnet med inspirasjon fra (Olsen mfl., 2015)	20
3.1	Modellområdet på Nadderud med og uten terrengmodell over det modellerte nedbørfeltet	24
3.2	Visualisering av ulike rasterlag med informasjon rundt infrastruktur, bygning og flomubredelse over samme topografi	31
3.3	Visualiseringen av konverteringen mellom vektor-format (venstre) til rasterformat (høyre). Hver celle i rasteret tilegnes FID-verdien fra vektordataen	32
3.4	Eksempler på inndelinger i klasser representert ved rektangler. Pilene viser mulig interaksjon mellom klassene mens prikkene viser at klassene/innholdet kan utvides.	33
3.5	Eksempel på cellene som danner omrisset rundt en bygning, ved celleoppløsning på 4x4 meter	35
4.1	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 5 år	44
4.2	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 10 år	44
4.3	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 50 år	44
4.4	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 100 år	44
4.5	Histogrammer over den totale kostnadsfordelingen ved ulik antall iterasjoner. y-aksen representerer sannsynlighetstetthet, slik at arealet under grad = 1. Gjentaksintervall på 50, 100, 200 og 1000 år er plottet.	45

4.6	Histogram over total kostnad av bygninger og biler ved gjentakintervall $T = 200$. Ulike lavere grense a for trekning av ϕ i den uniforme fordelingen $[a, b]$ er vist. Den øvre grensen holdes lik $b = 1$ for alle simuleringene.	47
4.7	Visualisering av bygninger som regnes som flomskadet i rødt, ved gjentakintervall 1000 år. Figur til venstre viser $\phi = [0.6, 1]$, i midten viser $\phi = [0, 1]$ og til høyre viser $\phi = [0, 0]$	47
4.8	Kostnadsfordeling mellom de ulike kategoriene i modellen, ved ϕ trukket fra $[0.6, 1]$, $D_{\text{skade}} = 0.1$ og nedbør med gjentakintervall 1000 år	48
4.9	Normaliserte kostnader for å bedre vise spredningen innad i kategorien, ved ϕ trukket fra $[0.6, 1]$, $D_{\text{skade}} = 0.1$ og nedbør med gjentakintervall 1000 år	48
4.10	Kostnadsfordelingen ved ulike gjentakintervall	49
4.11	Fordeling og variasjon av antall skader ved ulike gjentakintervall	49
4.12	Kostnader ved de modellerte gjentakintervallene, inkludert 5. og 95 persentiler.	51
4.13	Regresjonsligner for å ta hensyn til knekkpunktet rundt $T=20$	51
4.14	Forventede årlige kostnader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, integralet på toppen betegner den forventede årlige kostnaden ut i fra mediankostnaden.	51
4.15	Forventede årlige kostnader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, utenom 5 og 10-års gjentakintervall. Integralet på toppen betegner den forventede årlige kostnaden ut i fra mediankostnaden	51
4.16	Forventede årlige skader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn. Integralet på toppen betegner det forventede årlige skadeantallet ut i fra medianskadene.	52
4.17	Forventede årlige skader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, utenom 5 og 10-års gjentakintervall. Integralet på toppen betegner det forventede årlige skadeantallet ut i fra medianskadene	52
4.18	Forventede årlige kostnader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, hvor 5 og 10-årsregn er manuelt lagt inn etter skjønn. Integralet på toppen betegner den forventede årlige kostnaden ut i fra medianskaden	52
4.19	Forventede årlige skader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, hvor 5 og 10-årsregn er manuelt lagt inn etter skjønn. Integralet på toppen betegner det forventede årlige skadeantallet ut i fra medianskaden	52
4.20	Forventede årlige kostnader med utgangspunkt i ligning (3.5), hvor en statistisk prosentvis andel har blitt trukket fra den originale kostnadsfunksjonen (definert ved $\phi = [0.6, 1]$ og $D_{\text{skade}} = 0.1$) for å definere ligning (3.5) for flere scenarier.	53

C.1	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 5 år . . .	75
C.2	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 10 år . . .	75
C.3	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 15 år . . .	76
C.4	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 20 år . . .	76
C.5	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 50 år . . .	76
C.6	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 100 år . .	76
C.7	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 200 år . .	77
C.8	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 500 år . .	77
C.9	Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentaksintervall 1000 år . .	77
C.10	Maksimalvannstand i meter, ved nedbørshendelsen sjetten august 2016. . .	77

Tabeller

2.1	Utvalg av ulike Mannings n verdier for overflatestrømning	9
2.3	Kategorisering av kostnader som følge av urbane flomhendelser	17
2.5	Risikojustert diskonteringsrente klassifisert ut i fra levetiden til tiltaket	21
3.1	Beskrivelse av grunnlagsdataen benyttet ved utredelsen av overflatemodellen (hentet og modifisert fra Friborg og Deggerdal (2017))	26
3.2	Beskrivelse av innholdet i FKB-dataen benyttet i modellen	28
3.2	Beskrivelse av innholdet i FKB-dataen benyttet i modellen	29
3.3	Kostnader og sårbarhetsverdier for kategorien bygninger, hentet fra Sælt-hun (2018), justert via Hoven mfl. (2018)	30
4.1	Antall bygninger i modelleringsområdet hentet fra FKB-dataen, samt antall bygninger kategorisert som ”boliger” i Bærum kommune	42
4.3	Skadedata knyttet til ”vanninntregning utenfra” over Bærum kommune fra de siste 10 år (2008-2018). Kostnadene er gitt i nominelle kroner, og inkluderer ikke egenandel. Skadene fra hendelsen sjetten august 2016 er fremhevet	42
4.5	Antall flomutsatte bygninger ved ulike D_{skade} , alle andre restriksjoner for kvantifisering av flomskade fjernet	46
4.7	Estimerte skadedata knyttet til ”vanninntregning utenfra” over modelleringsområdet fra de siste 10 år (2008-2018). Kostnadene er gitt i nominelle kroner, og inkluderer egenandel (4500kr per skade). Skadene fra hendelsen sjetten august 2016 er fremhevet	50
4.9	Eksempler på nåverdi ved ulik reduksjon i kostnader	53
B.1	Kostnader og sårbarhetsverdier for kategorien bygninger, hentet fra Sælt-hun (2018), justert via Hoven mfl. (2018)	73
B.2	Kostnader og sårbarhetsverdier for kategorien veger og t-bane, hentet fra Sælt-hun (2018), justert via Hoven mfl. (2018)	73
B.3	Kostnader og sårbarhetsverdier for biler, hentet fra Sælt-hun (2018) og Karlsson og Larsson (2014)	74

Forkortelser

BKI	Byggekostindeks
DOM	Digital overflatemodell
DTM	Digital terrengmodell
EAD	Forventet årlig kostnad
FKB	Felles KartdataBase
GIS	Geografiske informasjonssystemer
IVF	Intensitet-varighet-frekvens
KPI	Konsumprisindeks
NNV	Netto nåverdi
PDE	Partial differential equation
SWMM	Storm Water Management Model

1. Introduksjon

1.1 Motivasjon og problemstilling

Den sjettede august 2016 ble det på flere målestasjoner i Asker og Bærum målt nedbør tilsvarende 200-års gjentaksintervall eller høyere, dette førte til at ledningsnettene gikk fulle og vann gikk over til å strømme på overflaten. (Bærumkommune, 2017; Andersen, 2017) Tall fra Finans Norge, som er hovedorganisasjonen for finansnæringen i Norge, viser at det i hele Bærum kommune ble registrert 872 skader med en total kostnad på 183 millioner, knyttet til "vanninntrengning utenfra" den sjettede august. I tillegg ble det registrert 116 tilfeller av "stopp i avløp - tilbakeslag" med en kostnad på 12,6 millioner.

Etttersom det forventes en økning av intensivt nedbør i Norge står kommuner overfor et stort ansvar for å utrede skadepotensialet ved pluviale flomhendelser, samt gjøre tiltak der det er nødvendig. De siste årene er det lansert en rekke tiltak som kan bidra til å håndtere urbane pluviale flommer. Eksempelvis lokale overvannstiltak som regnbødder, plastkassetter og annen fordrøying, eller tiltak i større skala, slik som bekkeåpninger. Det mangler dog en effektiv metode for å måle effekten sett opp mot investeringskostnaden av slike overvannstiltak. En metode som kan brukes er en kost-nytteanalyse sammen med en flommodell. I flommodellen kan effekten av et tiltak studeres ved å sammenligne hvor vannet tar veien, samt vannets utbredelse og mengde før og etter tiltaket. Deretter kan kost-nytteanalysen kvantifisere kostnadene før og etter tiltaket, og beregne en nytte ved å se på sparte kostnader gjennom tiltakets levetid. Problemet med tilnærmingen er at prosessen med å manuelt kvantifisere flomutsatte bygninger kan være svært tidkrevende og vanskelig.

Målet med denne oppgaven var derfor å konstruere en kost-nyttmodell som kunne kvantifisere flomskader direkte fra resultatene til flommodellen, sammen med tilgjengelig kartbasert informasjon over bygninger og infrastruktur (FKB-data). Deretter gjennomføre en kost-nytteanalyse, slik at det som ellers er en stor oppgave kunne reduseres til et par tastetrykk. I dette ligger det følgende oppfølgingsspørsmål

- Klarer modellen å kvantifisere flomutsatte bygninger og infrastruktur på en til-

fredsstillende måte, med data tilgjengelig i Norge?

- Hvor god blir modellen og kan den erstatte manuell tilnærming til flomkvantifisering?
- Hvilke usikkerheter er det, og hvor store blir de?

Det må påpekes at mye av stoffet i oppgaven omhandler kostnadene, og ikke nytte. Dette skyldes at det er kostnadene som er det avgjørende momentet for nytten. Nytten kommer med andre ord som en følge av kostnadene. I tiltakssammenheng er det allikevel ofte nytten som er av interesse. Derfor vil også et eksempel på nytteberegning utføres i oppgaven.

1.2 Relatert arbeid

Kost-nytte analyser har blitt brukt i sammenheng med urbane pluviale flommer tidligere. Eksempelvis har Sælthun (2018) konstruert en kost-nytte modell som Hoven mfl. (2018) benyttet til å kvantifisere kost-nytte ved modellerte tiltak ved to lokasjoner i Oslo kommune. I Sverige og Danmark har også slike analyser blitt utført, blant annet har Sweco i Sverige utviklet sitt eget kost-nytte verktøy ”Sweco CBA” som Karlsson og Larsson (2014) skriver om i sin masteroppgave. I Danmark har Zhou mfl. (2012), Zhou mfl. (2013) og Olsen mfl. (2015) utarbeidet en integrert kost-nytte modell i et geografisk informasjonssystem.

Denne oppgaven har tatt inspirasjon fra de overnevnte oppgavene, men fremgangsmåten med å automatisk kvantifisere flomskade er noe som er lite utforsket.

1.3 Struktur

Opgaven er bygd på klassisk ”IMRAD”-stil (introduksjon, metode, resultat og diskusjon), i tillegg inkluderes et bakgrunnskapittel som presenterer den nødvendige teoretiske bakgrunnen for å kunne få mest mulig ut av resultatene og diskusjonen.

På generelt grunnlag er oppgaven tverrfaglig, med innspill av overvann, programmering og økonomi. Det legges opp til at det ikke skal være nødvendig med bakgrunnskunnskap innenfor programmering og økonomi utover det som kan forventes fra en mastergrad innenfor vann- og miljøteknikk. Der det er nødvendig fokuseres det heller på å forklare tankegangen bak, kontra spesifikke detaljer rundt utførelse.

2. Bakgrunn

I dette kapitlet presenteres det teoretiske fundamentet som er nødvendig for å forstå valgene og analysen i resten av oppgaven. Kapitlet deles inn i fire, først et avsnitt om overvann, hvor prinsippene bak dannelse av overflateavrenning presenteres. Deretter en kort introduksjon til viktige prinsipper ved bruk av kartdata, før det avslutningsvis gis en gjennomgang av prinsippene bak flommodellering og kost-nytte analyse.

2.1 Grunnleggende om overvann

Overvann kan defineres som overflateavrenning som følge av nedbør eller smeltevann (NOU2015:16, 2015). Mengden og avrenningsforløpet til overflatevannet varierer stort ut i fra stedlige forhold og nedbørskarakteristikk. Et nedbør som gir skade et sted kan med andre ord gi moderate eller ingen skader et annet sted og visa versa. Det finnes ingen fasit for når en skadelig overvannshendelse oppstår, men i de neste avsnittene presenteres de generelle faktorene som bidrar til skadelige hendelser.

2.1.1 Nedbørskarakteristikk

Generelt sett er det nedbør av høy intensitet som gir problemer knyttet til overflateavrenning. Dette er fordi evnen et område har til å ta unna vann er begrenset per tid, og i tillegg er kapasiteten tilnærmet konstant (litt større i starten grunnet nedbørstap som gropmagasinering o.l.). Derfor vil et 15 mm nedbør kunne utgjøre stor skade hvis det kommer på fem minutter, mens tilsvarende nedbørsmengde i løpet av en time kan utgjøre ingen skade.

IVF-kurver

For å karakterisere ulike nedbørsintensiteter benyttes intensitet-varighet-frekvens (IVF) kurver. I en IVF-kurve kan intensiteten (eksempelvis i mm h^{-1}), regnvarighet og gjen-

taksintervallet leses ut. IVF-kurven er standarden for å finne dimensjonerende nedbørsparametere i Norge, og kurver for ulike målestasjoner leveres av Norsk Klimaservicesenter¹. Det er viktig å påpeke at nedbør med likt gjentaksintervall ikke nødvendigvis gir lik avrenningsrespons, et 200-årsregn over 24 timer gir eksempelvis mer vann, men med mindre intensitet enn et 200-årsregn over 1 time, noe som gir en annen karakteristikkk på avrenningsprosessen, og dermed skadeforløpet.

Generelle ekstremverdifordeling

I Norge har standarden for beregning av nedbørsintensitet og gjentaksintervall til bruk i blant annet IVF-kurver vært utført ved hjelp av Gumbel-fordelingen (Dyrrdal, 2012). Ved ekstremverdimodellering ser man på halene av distribusjonen, hvor få eller ingen målepunkter eksisterer (Ragulina og Taurisano, 2014). Dette betyr at verdiene må bestemmes ved ekstrapolasjon. Ved den generelle ekstremverdifordelingen finnes størrelsen av en tilfeldig hendelse x ved et gjentaksintervall T ved

$$x_T = \begin{cases} a + \frac{b}{c} \left[1 - \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^c \right] & , \quad c \neq 0 \\ a + b \cdot \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) & , \quad c = 0 \quad (\text{Gumbel}) \end{cases} \quad (2.1)$$

hvor a , b og c er lokasjon, skala og formparametere (Chin, 2013; Ragulina og Taurisano, 2014). Dyrrdal (2012) påpeker på at bruken av Gumbel-fordelingen i Norge ble bestemt ut i fra forskning hovedsaklig utført på 80- og 90-tallet. I senere år viser derimot både teori og observasjoner at Gumbel-fordelingen undervurderer størrelsen av nedbørstilfeller ved store gjentaksintervall. Derfor anbefaler Dyrrdal (2012) at vi i Norge bør gå over til ekstremverdifordeling med bruk av form-parameteren som gir større hale på fordelingen. Denne overgangen er blant annet gjort i Sverige og Danmark. I skrivende stund er IVF-kurvene i Norge fortsatt lagd med Gumbel-fordelingen som utgangspunkt, og det vil være grunnlaget benyttet videre i oppgaven.

Syntetiske nedbør: Symmetrisk blokkhyetogram

Syntetisk nedbør er et konstruert nedbør som ofte benyttes i modelleringssammenheng. Nedbøret konstrueres ved hjelp av IVF-kurver. Det finnes flere ulike typer av syntetiske nedbør, blant de vanligste er kassenedbør, trekantnedbør, symmetriske blokkhyetogram og Chicago-metoden. De tre sistnevnte er å foretrekke, spesielt ved modellering av konvektive nedbør, da de inkorporerer en kortere toppintensiteten som er karakteristisk for

¹<https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>

bygenedbør. I Sverige og Danmark er Chicago-metoden mye brukt.

I denne oppgaven benyttes symmetrisk blokkhyetogram for å konstruere nedbør. I et blokkhyetogram hentes nedbørintensiteter fra alle ulike nedbørslengder med et valgt beregningssteg. På denne måten representerer de x mest intensive minuttene samme volum som nedbør fra IVF-kurven med varighet x minutter.

Klimaendringer

Det forventes at klimaendringer vil føre til vesentlig økning av nedbør i Europa, hvor Skandinavia vil se størst økning. Det er spesielt korte intensive regnskyld som forventes å øke mest (Hov mfl., 2013; Larsen mfl., 2009; Hanssen-Bauer mfl., 2009). I følge Larsen mfl. (2009) vil eksempelvis et timeslangt 20-årsregn i Sverige i dag, være et 4-årsregn i fremtiden. I Norge er det vanlig å benytte et klimapåslag ved beregninger knyttet til overvann, eksempelvis anbefaler NorskKlimaservicesenter (2017) et klimapåslag på minst 40% av dagens nedbør ved nedbørvarighet under tre timer i Oslo og Akershus.

2.1.2 Nedbørtap og effektiv nedbør

Nedbørtap kan beskrives som den delen av nedbøren som ikke ender opp som avrenning. De viktigste formene for nedbørtap er intersepsjon, gropmagasinering og infiltrasjon, hvor infiltrasjon utgjør det største tapet. Nedbørtapet er svært avhengig av geografisk lokasjon, og vil variere sterkt mellom eksempelvis by og skog. Evaporasjon ses bort ifra ved korte hendelser. For å beskrive andelen nedbør som bidrar til avrenning kan vi da definere begrepet effektivt nedbør P_e , som kan defineres ved

$$P_e = P - P_{\text{tap}} \quad (2.2)$$

hvor P og P_{tap} betegner nedbør og nedbørtap.

Intersepsjon

Intersepsjon er nedbørtap som skyldes oppsamling av vann, primært på vegetasjon, men også bygninger og andre objekter som kan samle vann på overflaten. Intersepsjon kan bidra til vesentlig nedbørtap ved lengre nedbørshendelser, men er mindre viktig ved kortere og mer intensive nedbørshendelser. Dette er først og fremst fordi større dråper ikke festes til vegetasjonen på samme måte som mindre dråper.

Gropmagasinering

Gropmagasinering betegner nedbørtap som følge av opphopning av vann i groper, sprekker eller lignende (Bøyum mfl., 1997), hvor vannet blir liggende uten å føre til videre avrenning. Gropmagasinering er avhengig av overflatekarakteristikken, mer om dette i avsnitt 2.1.3.

Infiltrasjon

Infiltrasjon betegner prosessen hvor overflatevann trenger gjennom overflaten, videre bevegelse i jorda betegnes ikke som infiltrasjon, men som perkolasjon. Infiltrasjon er det største bidraget til nedbørtap, og er derfor svært viktig å kunne modellere i en flomsituasjon. Fra et fysisk perspektiv kan infiltrasjonsmengden defineres ved perkolasjonsraten nær overflaten. Standardmodellen for umettet strømning, som er tilfellet ved infiltrasjon gis ved Richards ligning (Richards, 1931), her gjengitt en-dimensjonalt i vertikal retning

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

hvor

θ	vanninnhold [–]
t	tid [T]
K	hydraulisk konduktivitet [L/T]
z	vertikal avstand fra definert datum [L]
h	vannets energihøyde [L]

Ettersom Richards ligning er en partiell differensiallikning (PDE) som ikke enkelt kan løses analytisk, benyttes ofte empiriske modeller som Green-Ampt (Heber Green og Ampt, 1911) eller Horton (Horton, 1933). Ettersom modellen benyttet i denne oppgaven (MIKE FLOOD) har utviklet en egen infiltrasjonsmodell, som skiller seg fra de vanligste modellene, gis det en introduksjon til prinsippene bak modellen benyttet i MIKE FLOOD.

MIKE FLOOD gir to ulike valg for beregning av infiltrasjon, de to modellene kalles henholdsvis netto infiltrasjon og konstant infiltrasjon med kapasitet (DHI, 2016). Begge modellene benytter konstant infiltrasjon per tidsenhet, som defineres cellevis over området som modelleres. På den måten tillater modellen geografisk differensiering av infiltrasjon.

Selve infiltrasjonsberegningen går ut på å beregne et infiltrasjonsvolum V_{inf} som trekkes

fra vannhøyden H på cella for hvert tidssteg på følgende måte

$$H(j, k) = H(j, k) - \frac{V_{\text{inf}}(j, k)}{\Delta x \Delta y} \quad (2.4)$$

hvor Δx og Δy representerer cellestørrelsen. Definisjonen av V_{inf} er forskjellig i de to modellene. Ved netto infiltrasjon bestemmes V_{inf} rett fra infiltrasjonsevnen bestemt cellevis gjennom rasteret over infiltrasjonsverdier. Den infiltrerte vannmengden er med andre ord alltid den samme for hvert tidssteg Δt i modellen, så fremt det finnes vann på cella.

Ved konstant infiltrasjon med kapasitet er beregningen av V mer komplisert. Følgende parametere må defineres cellevis.

- Infiltrasjonsrate
- Porøsiteten til det umettede laget
- Mektigheten til det umettede laget
- Perkolasjonsraten mellom det umettede laget og grunnvannet
- Initiell verdi for vannmengde i det umettede laget

Deretter utføres beregningen ved først å definere perkolasjonsvolumet V_1 for celle (j, k) ved

$$V_1(j, k) = Q_1(j, k) \Delta t \Delta x \Delta y$$

$$V_1(j, k) = \min \begin{cases} V_1(j, k) \\ V_i(j, k) \end{cases}$$

$$V_i(j, k) := V_i(j, k) - V_1(j, k)$$

der Q_1 er perkolasjonsrate og V_i er vannmengden i den umettede sonen. Videre beregnes den infiltrerte vannmengden V_{inf} ved

$$V_{\text{inf}}(j, k) = Q_i(j, k) \Delta t \Delta x \Delta y$$

$$V_{\text{inf}}(j, k) = \min \begin{cases} V_{\text{inf}}(j, k) \\ SC_i(j, k) - V_i(j, k) \\ H(j, k) \Delta x \Delta y \end{cases}$$

$$V_{ij, k} := V_i(j, k) + V_{\text{inf}}(j, k)$$

der Q_i er infiltrasjonsrate, $SC_i(j, k)$ er vannlagringskapasitet og $H(j, k)$ er vanndybden på overflaten. Vannlagringskapasiteten defineres ved

$$SC_i(j, k) = Z_i(j, k) \Delta x \Delta y \gamma(j, k)$$

der $Z_i(j, k)$ er mektigheten til det umettede laget og $\gamma(j, k)$ er porøsiteten. Etter beregningene er utført kan V_{inf} benyttes direkte inn i ligning (2.4). Som vi ser minimaliseres alltid de ulike volumene tilgjengelig til perkolasjon og infiltrasjon, slik at modellen aldri opplever negative mengder vann.

Avslutningsvis er det viktig å påpeke at nøkkelen bak analyse av enhver infiltrasjonsmodell er god grunnlagsdata, spesielt over infiltrasjonskapasitet. Problemet er at det kan være stor variasjon i infiltrasjonskapasitet over et område, spesielt hvis deler av jorden har vært bearbeidet. Eksempelvis fant Solheim (2017) i sin masteroppgave at infiltrasjonsevnen kunne variere sterkt innenfor mindre areal, slik som på en enkelt tomt, og at det bør utføres flere infiltrasjonsprøver, selv på mindre areal.

2.1.3 Overflatekarakteristikk

Måten overvann brer seg kan ha stor påvirkning på en nedbørshendelse sitt skadepotensial. Det er eksempelvis stor forskjell på hvordan vann beveger seg over glatte kontra ru overflater. Ved glatte overflater vil vannet få en betraktelig større hastighet enn ved ru overflater. En ru overflate har også større evne til å holde igjen vann (gropmagasinerings), ruhetsgraden gis eksempelvis ved Mannings tall for overflatestrømning.

Konsentrasjonstid og nedbørfelt

Ved hydrologiske analyser er det vanlig å begrense seg til nedbørfelt. Nedbørfelt er definert som et område hvor all nedbør som faller på området renner av til samme punkt, gjerne kalt utløpet. Volumstrømmen som ender opp i utløpet til enhver tid kalles responsen til nedbørfeltet. For å representere responsen innføres gjerne begrepet konsentrasjonstid, som er omvendt proporsjonal med responsen. Lavere konsentrasjonstid gir større respons. Konsentrasjonstid er ikke et fast definert begrep, men defineres ofte som tiden det tar for nedbør å renne fra det fjerneste hydrauliske punktet (ikke geometriske) i feltet til utløpet (Saghafian og Julien, 1995). Konsentrasjonstiden uttrykkes gjerne på følgende måte

$$t_c = f(i_e, L, S_0, C) \quad (2.5)$$

hvor

t_c	konsentrasjonstiden [T]
i_e	effektiv nedbørsintensitet [L/T]
L	feltets lengde [L]
S_0	feltets helning [–]
C	ruhetsparameter [–]

Generelt er feltets lengde og feltets helning konstante parametere, mens den effektive nedbørsintensiteten avhenger av nedbørshendelsen. Ruheten til overflaten kan derimot forandres, enten som naturlig variasjon gjennom året, eller ved menneskelig påvirkning i form av eksempelvis utbygging. I tabell 2.1 gis eksempelverdier på ruhet gitt ved Manningstall for noen utvalgte overflater.

Tabell 2.1: Utvalg av ulike Mannings n verdier for overflatestrømning

Type overflate	Mannings n	Område
Asfalt	0.012	0.010-0.018
Grus	0.02	0.012-0.033
Gressplen	0.25	0.20-0.30
Skog	0.40	0.3-0.95

Kilde: Chin (2013)

2.2 Geografiske informasjonssystemer

Ved overvannsanalyser er kartdata og geografiske informasjonssystemer (GIS) svært viktige, ettersom det her det meste av informasjonen og dataen som benyttes i analysen hentes fra, i tillegg til at analyseverktøyene ofte er svært tilknyttet et GIS. I dette avsnittet gis en kort introduksjon til viktige kartdata og formater som benyttes videre i oppgaven.

2.2.1 Felles Kartdatabase

Felles kartdatabase (FKB) er en kartsamling bestående av detaljerte kart over blant annet infrastruktur, boligmasse, biotyper og mye mer (Geovekst, 2013). Blant det mest relevante ved overvannsanalyser er detaljerte data over byer og tettsteder. Herunder data over bygninger (inkludert bruksområde, bolig, forretning etc), veier, jernbane, elektro og vann og avløp.

2.2.2 Vektor- og rasterdata

Det finnes to hovedmetoder for å representere kartdata, henholdsvis vektor- og rasterdata. Ved vektordata defineres objektene (hus, innsjøer, jorder etc) ved punkter med definerte geografiske koordinater, deretter kan objektene defineres ved å dra linjer mellom punktene. På denne måte kan et firkantet hus representeres av fire punkter plassert

på husets hjørner. Dette tillater en svært nøyaktig presentasjon av huset. FKB-data er lagret på vektorformat.

Ved rasterdata deles området som studeres opp i celler med definert størrelse og koordinater. Objekter tegnes ved å tilegne en verdi til de cellene som best overlapper objektet. Oppløsningen til objektet er med andre ord begrenset av størrelsen på rastercellene. Fordelen med denne representasjonen er at det kan være enklere å gjøre analyse på data fordelt cellevis (eksempelvis ved matriseoperasjoner).

2.3 Modellering av urbane pluviale flommer

Modellering av urbane pluviale flommer er en kompleks øvelse, hvor en rekke disipliner kongrueres til et resultat. Det finnes flere programvarer designet for flommodellering, blant de mest kjente modellene er SWMM (Storm water management model) og MIKE FLOOD. Det er generelt sett stor variasjon mellom flommodeller, eksempelvis viste Kourtis mfl. (2017) at MIKE FLOOD modellen tok fire timer å kjøre, mens SWMM-modellen brukte ti sekunder på et modelleringsområde i Aten. Årsaken til forskjellene, samt hvilke usikkerheter og databehov det er rundt urbane pluviale flommer vil presenteres i dette avsnittet.

2.3.1 Ikke-stasjonær strømning

Kjernen ved alle hydrauliske routing analyser er numerisk beregning av ikke-stasjonær strømning for inkompressible væsker ved hjelp av Navier-Stokes ligninger. Navier-Stokes ligninger (2.7) kan utledes fra kontinuitetsprinsippet for inkompressible væsker (ligning 2.6) og Newtons andre lov

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (2.7)$$

hvor

x, y, z	kartesike koordinater [L]
u, v, w	hastighetskomponenter i x, y og z-retning [L/T]
t	tid [T]
p	trykk [M/T ² L ²]
g	tyngdensaksellerasjon [M/T ²]
ρ	væskens tetthet [M/L ³]
μ	viskositet [L ² /T]

Med Navier-Stokes ligninger (2.7) kan tilnærmet alle situasjoner knyttet til strømning løses, men i de aller fleste tilfeller er beregningene alt for dyre å gjennomføre tidsmessig sett. Av den grunn settes heller begrensning og antagelser for å forenkle ligningene slik at de lar seg løse innenfor rimeligere tidsrammer. Eksempler på dette kan være å nedskalere antall dimensjoner, slik at man beregner kun på en eller to dimensjoner. Ved beregning i en og to dimensjoner tillates det fortsatt kvantifisering av flomdybde, flomutbredelse og hastighet (Gilles og Moore, 2010).

En-dimensjonale modeller

Ved beregninger på kanaler eller på objekter med egenskaper som kanaler, eksempelvis overvannsrør, benyttes som oftes en-dimensjonale ligninger kalt St. Venants ligninger. (Bates og De Roo, 2000). St. Venants ligninger beskriver bevaring av masse og bevaring av momentum. En-dimensjonale modeller får beregningsproblemer hvis vannet i beregningsområdet (kanalen) beveger ut av sitt definerte område, spesielt i overgangs-områdene hvor kompliserte strømningsmønstre oppstår. For å inkorporere hva som skjer mellom kanaler og overflatene rundt er det nødvendig med to eller tre-dimensjonale modeller (Bates og De Roo, 2000).

To-dimensjonale modeller

For å inkorporere kompleksiteten i overgangen mellom kanal og nærliggende områder benyttes dybde-midlet Navier Stokes ligninger, også kjent som St. Venants grunt vannsligninger i to dimensjoner (Bates og De Roo, 2000). De to-dimensjonale grunt vannsligningene evner å beregne overflatestrømning på en detaljert måte, de gir i tillegg bedre mulighet til å visualisere flomutbredelsen enn en-dimensjonale modeller som kun kan vise fyllingsgrad i et rør eller kanal. To-dimensjonale modeller er vesentlig mer komplekse, og tidkrevende å løse, noe som er grunnen til at modellene Kourtis mfl. (2017) prøvde opplevde så stor forskjell i simuleringstid. Detaljeringsgraden på overflaten kan ha stor betydning for resultatene de to-dimensjonale modellene gir, derfor er modellene

avhengig av god grunnlagsdata med tilstrekkelig oppløsning, slik at viktige elementer på terrenget (eksempelvis fortauskanter, trafikkøyer) kan modelleres.

Koblede modeller

For å bedre representere flomsituasjoner i urbane setting har en-dimensjonelle modeller og to-dimensjonelle modeller blitt slått sammen i så kalte koblede 1D-2D-modeller (Fraga mfl., 2017; Chen mfl., 2016). Ved koblede modeller benyttes de sterkeste sidene fra en og to-dimensjonale modeller til å lage en mer beregningseffektiv modell. I urbane områder kobles også ledningsnett opp mot overflatemodellen, noe som er svært viktig for å kunne modellere urbane flomhendelser nøyaktig. (Chen mfl., 2007).

2.3.2 Ledningsmodell

De ulike komponentene i et ledningsnettverk representeres i de fleste tilgjengelige modeller ved knutepunkt (noder) og ledninger (Rossman, 2017; DHI, 2009). Nodene representerer punktlignende komponenter, i hovedsak kummer, men også andre komponenter som sluk, overløp og lignende. Ledninger representerer hva som skjer mellom nodene. Som regel er ledningene definert ved lengde, diameter, ruhet og så videre, men i enkelte sammenhenger kan også pumper og ventiler defineres på denne måten. Tilsammen gir nodene og ledningene en fullverdig representasjon av et ledningsnettverk.

2.3.3 Overflatemodell

For å bygge overflatemodellene settes topografisk informasjon, nedbørsdata og overflatekarakteristikk sammen. Ut i fra hvilken beregningsmodell som benyttes foregår beregningene på ulike måter. Generelt for alle overflatemodeller er at det settes høyere krav til både datagrunnlaget og utførelse, ettersom de som regel og spesielt i urbane settinger, beregninger svært komplisert strømning. Av den grunn er det ekstra viktig å være obs på usikkerheten som medfølger i modelleringen.

2.3.4 Databehov og usikkerhet

God grunnlagsdata er essensielt for å kunne konstruere en god urban flommodell. Wang mfl. (2018) identifiserte fire hovedproblemer knyttet til usikkerhet og modellkvalitet

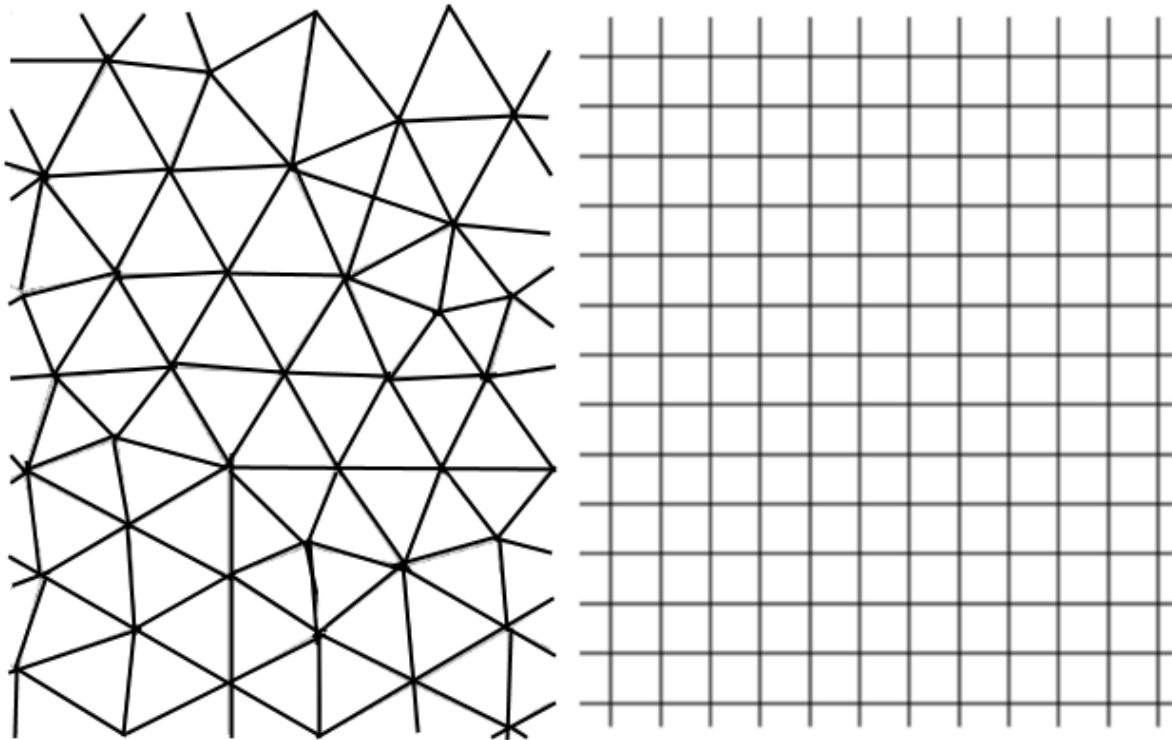
- Detaljnivå på det topografiske terrenget, og urbane nøkkelfunksjoner som fortauskanter, trafikkøyer og lignende
- Mangel på kalibrering og valideringsdata
- Metodikken bak interaksjonen mellom overflatevann og transportsystemene under bakken
- Usikkerhet rundt fremtidig arealbruk

Målet med denne oppgaven er ikke å løse disse problemene, men det er viktig å være klar over hvilke usikkerheter som knyttes til urbane flommodeller. Derfor vil resten av avsnittet gå til å adressere disse problemene i norsk kontekst.

Topografisk detaljnivå

For å representere topografien i overflatemodellen trengs gode digitale modeller. Generelt differensieres det mellom digitale terrengmodeller (DTM) og digitale overflatemodeller (DOM), hvor overflatemodeller inkluderer objekter på terrenget slik som hus og lignende. Detaljnivået er spesielt viktig ved modellering i urbane strøk, hvor objekter som fortauskanter, trafikkøyer og lignende kan ha stor påvirkning på hvilken vei vannet renner (Chen mfl., 2012a,b).

Digitale høydemodeller kan i modelleringssammenheng representeres enten som rasterdata eller vektordata (se avsnitt 2.2.2). Representasjon ved rasterdata er ofte enklere å gjøre beregninger på, mens på vektorform kan man styre oppløsningen rundt spesifikke områder ved tilpasning av triangulære irregulære nettverk (Se figur 2.1).



Figur 2.1: Grafisk fremstilling av forskjellene mellom nettverk av irregulære trekanter (venstre) og rasterceller (høyre)

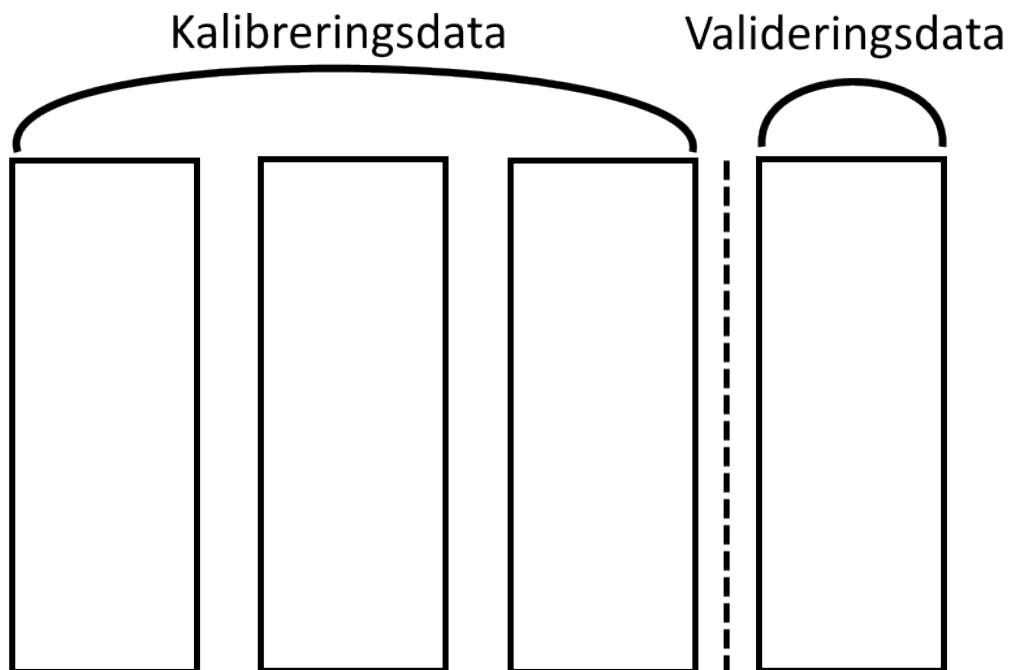
Gjennom prosjektet ”Nasjonal detaljert høydemodell”² registreres digitale høydemodeller med oppløsning på 1x1 meter for hele Norge. Høydedataen, inkludert laserpunktskyene, ligger tilgjengelig gratis på nett gjennom www.hoydedata.no, slik at egne modeller kan konstrueres fra laserpunktene ved hjelp av GIS-programvare. Laserpunktskyene er såpass detaljert at også mer detaljerte modeller kan konstrueres, men dette er som regel ikke fordelaktig. I den forstand er det veldig god tilgjengelighet på topografiske data i Norge.

Kalibrering og valideringsdata

Ettersom det normalt sett ikke foreligger gode historiske målinger av flombredelser ved urbane pluviale flommer kan kalibreringsprosessen være krevende. For å få bukt med dette anbefales det å bruke flerfoldige kilder til å validere flomnivåer (Wang mfl., 2018). Kildene kan inkludere historiske målinger (eksempelvis av nedbør, volumstrøm i rør og lignende), erfaringer gjort av kommunalt ansatte, undersøkelser av skader på trær (Ballesteros mfl., 2011) eller i nyere tid, bilder fra sosiale medier (Wang mfl., 2018).

²<https://www.kartverket.no/Prosjekter/Nasjonal-detaljert-hoydemodell/om-nasjonal-detaljert-hoydemodell/>

I kalibreringsarbeidet er det vanlig å endre modellparametere (eksempelvis infiltrasjonskapasitet, overflateruhet og lignende) slik at resultatene tilpasses valideringsdataen. Mark mfl. (2014) anbefaler at det bør være flere hendelser med kalibreringsdata enn modellparametere som endres for å sikre en god modell, slik at man har et datasett til å validere og de resterende datasettene til å kalibrere (figur 2.2). Det vil si at dersom man endrer eksempelvis infiltrasjonsevnen og overflateruheten bør man minimum ha tre sett med kalibreringsdata, hvor to av datasettene brukes til kalibrering og et til å validere at modellen predikerer riktig. Kalibreringsdataen kan være målinger fra tre ulike regnhendelser. Mark mfl. (2014) anbefaler også at det minimalt bør være tre sett med kalibreringsdata for urbane flommodeller.



Figur 2.2: Prinsippet bak å benytte enkelte av datasettene til kalibrering, og enkelte til validering av kalibreringen

Interaksjon mellom overflatevann og ledningsnett

Som vist i avsnitt 2.3.2 og 2.3.3 beregnes strømming med ulike prinsipper på overflaten og i ledningsnett. For at overføringen av vann mellom modellene skal fungere korrekt må de synkroniseres, slik at det er sammenheng mellom tidspunktet vann går mellom modellene. I tillegg må punkter hvor vannet kan gå mellom modellene defineres. I den virkelige verden er vi vant til at overvannet går ned i ledningsnett gjennom ulike sluk, gjerne plassert langs veier eller i lavpunkter i terrenget. I modelleringsammenheng er

dette problematisk av to grunner. Først og fremst at det finnes ekstremt mange sluk i et urbant område (eksempelevis 35000 sandfag i Oslo (Thorolfsson, 2011), pluss andre typer sluk). Så mange punkter hvor modellene skal interagere med hverandre kan være problematisk, og føre til modellkrasj. I tillegg mangler det ofte god data over plassering av sluk (Chen mfl., 2007).

An annen stor usikkerhet er hvorvidt drenering og takløp fra hus er påkoblet direkte på overvannsledningene. Dette kan potensielt føre til at store deler av nedbøren føres direkte til overvannsledningene på svært kort tid, som igjen kan føre til fulle overvannsledninger. Ettersom tak gjerne utgjør en stor andel av arealet i et område kan dette potensielt gi mye vann i overvannsledningene som ellers kunne vært infiltrert eller ført i egnede flomveier på overflaten.

I modelleringspraksis er det vanlig å benytte kummer som koblingspunkt mellom overflate- og ledningsmodell (Chen mfl., 2007; Chen mfl., 2016). I virkeligheten vil, som nevnt, vannet finne veien til overvannsledningene gjennom sluk og ikke kummer. Overførsel fra ledningsnettet opp til overflaten kan derimot forekomme gjennom kummer, så fremt overtrykket ved kummen er nok til å løfte kumløkket av. En mer sannsynlig situasjon er at kumløkket løftes delvis og slipper ut vann. Chen mfl. (2016) introduserte en ny modell for beregning av interaksjonen mellom overflatevann og ledningsnett, hvor blant annet vekten av kumløkket og sluk er inkludert.

2.4 Kost-nytteanalyse ved urbane pluviale flommer

I dette avsnittet vil de sentrale komponentene bak kost-nytte analyse presenteres, herunder definisjon av formål, kostnader og beregningsmetodikk. For en grundig og detaljert beskrive henvises det til NOU1998:16 (1998) og NOU2012:16 (2012). I tillegg vil fokuset ligge på kost-nytteanalyse av tiltak mot urbane flomhendelser ettersom det er mest relevant for oppgaven.

2.4.1 Formål

Ved ethvert tilfelle hvor en beslutning skal fattes er det naturlig å tenke i et kost-nytte perspektiv. I enkelte tilfeller vil det eksempelvis være nyttig å velge en større investeringskostnad, dersom det over levetiden til beslutningen gir større nytte. Eksempler på slike beslutninger kan være dimensjonering av en flomvei, hvor en større dimensjon og investering i dag kan gi vesentlig reduserte skadekostnader på sikt. Det er nettopp klarleggingen og synliggjøringen av de alternative tiltakene som er hovedformålet ved

kost-nytteanalyse (NOU1998:16, 1998).

2.4.2 Kostnader

Innenfor kost-nytteanalyser av urbane flomhendelser er det tre hovedkategorier av kostnader. Investeringskostnad i forbindelse med et tiltak, materielle skadekostnader som er kvantifiserbare ved kroneverdi og immaterielle kostnader som ikke er kvantifiserbare i kroneverdi (Lekuthai og Vongvisessomjai, 2001). Videre kan kostnadene deles inn i indirekte og direkte kostnader. Messner mfl. (2007) kategoriserte kostnadene på følgende måte

Tabell 2.3: Kategorisering av kostnader som følge av urbane flomhendelser

	Materielle	Immaterielle
Direkte	Fysisk skade på eiendeler - Bygninger - Innbo - Infrastruktur	- Tap av liv - Helseforringende effekter - Tap av økologiske goder
Indirekte	- Tap av produksjonstid - Trafikkstopp - Kostnader ved nødsituasjoner	- Ulemper knyttet til opprydning - Psykisk påkjennelse som følge av hendelsen

Investeringskostnaden stilles i egen kategori, da den er avhengig av byggekostnaden på det flomdempende tiltak.

Kostnadskvantifisering

For å kunne gjennomføre en kost-nytteanalyse er det nødvendig å ha kvantifiserbare verdier, i antall kroner eller antall hendelser, knyttet opp mot de ulike kostnadskategoriene. For de direkte materielle skadene er i følge Messner mfl. (2007) de vanligste metodene prisestimering ved markedsverdi, reparasjonskostnad og forsikringsdata. Valget av metode avhenger først og fremst av kvaliteten og tilgjengeligheten på data. I denne oppgaven er markedsverdi benyttet til å gi prisestimer, mer om det i kapittel 3.

Beregning av immaterielle kostnader er mer komplisert. I følge Armbrecht mfl. (2012) er det to metoder som er rådende, henholdvis uttalte preferanser og avslørte preferanser. Uttalte preferanser kan eksempelvis kvantifiseres ved spørreundersøkelser over villighet til å betale for å unngå en fremtidig skadehendelse. Torgersen og Navrud (2018) utførte blant annet en undersøkelse på dette i Norge knyttet til overflateflom. Avslørte preferanser er metoder som baserer seg på observasjoner av menneskers holdninger, eksempelvis ved å gjøre en hedonisk prisevaluering på immaterielle goder som nærhet til parker eller

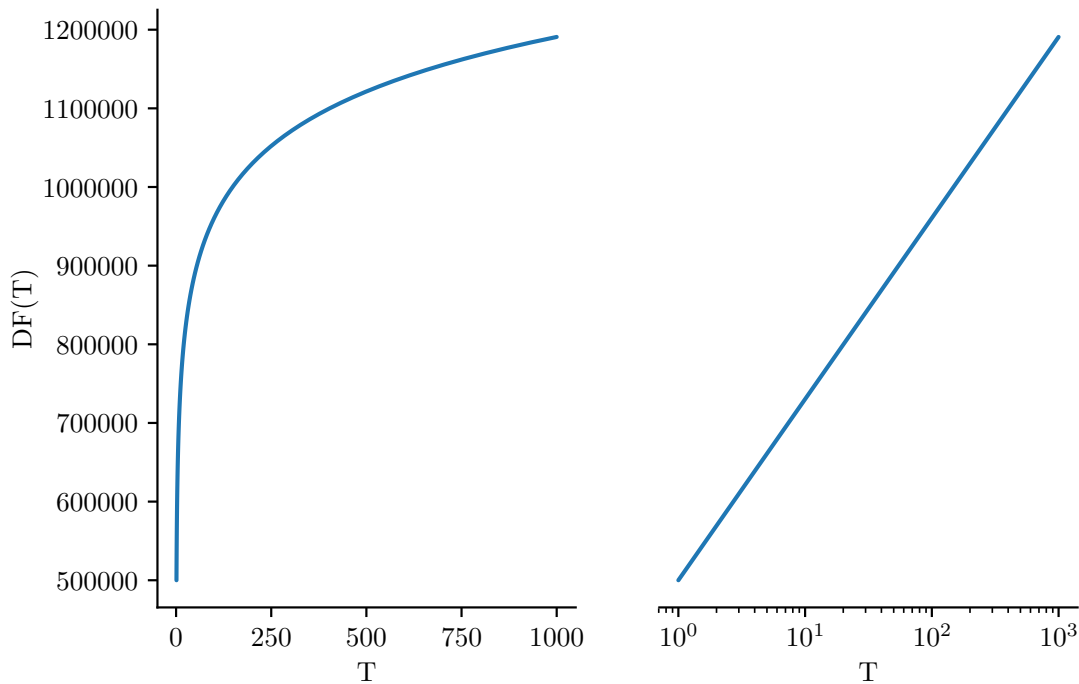
andre fasiliteter. I denne oppgave fokuseres det ikke på immaterielle kostnader, derfor vil det ikke gis en mer detaljert beskrivelse.

Kostnadsutvikling ved urbane pluviale flommer

Skadekostnaden ved urbane pluviale flommer, samt andre ekstremhendelser, antas å være log-lineær på formen (Zhou mfl., 2013; Sælthun, 2018)

$$DF(T) = a \cdot \log(T) + b \quad (2.8)$$

hvor $DF(T)$ betegner skaden ved et gjentakintervall T og a og b er interpolasjonskonstanter.



Figur 2.3: Skadefunksjonen 2.8 plottet med lineær x-akse og log x-akse. a og b er satt til henholdsvis 10000 og 50000 for å demonstrere forskyvningseffekten de har

2.4.3 Nytte

Nytte kan defineres som sparte kostnader (K) som følge av et tiltak. Gitt nytten N til et tiltak kan vi med andre ord definere

$$N = K_{\text{uten tiltak}} - K_{\text{med tiltak}} \quad (2.9)$$

Kostnadene i nytteberegningen må beregnes over hele tiltakets levetid. Etersom levetiden til et tiltak gjerne er 80-100 år må derfor også nytten beregnes over tilsvarende tidsperiode. Problemet er at kostnadene ikke påløper med jevne mellomrom, samt at kroneverdien om 100 år ikke er den samme som i dag, og det er i dag beregningen utføres. Dette løses ved å innføre en nåverdiberegning. Nåverdien viser verdien den samlede nytten og kostnaden har *i dag*. Ved nåverdimetoden beregnes den årlige nytten n år frem i tid. Netto nåverdi (NNV) gis ved

$$NNV = -I_0 + \sum_{t=0}^n \frac{U_t}{(1+k)^t} \quad (2.10)$$

hvor

NNV	Netto nåverdi
I_0	Investeringskostnaden på tiltaket
U_t	Nytten ved år t
k	Diskonteringsrente

Dersom NNV er positiv sier vi at tiltaket har en positiv samfunnsøkonomisk verdi, som betyr at samfunnet vil spare penger ved å gjennomføre tiltaket (NOU2012:16, 2012).

Den årlige nytten U_t

Ved beregning av NNV er det som vist i ligning 2.10 nødvendig å beregne nytten for hvert år. Fra ligning 2.9 ser vi at også forventede påløpte kostnader med og uten tiltak i en gitt tidsperiode må beregnes. Det betyr at det er nødvendig å definere en forventet årlig kostnad (EAD), ettersom regn har en gitt sannsynlighet for å inntreffe for et gitt år må modellen ta høyde for dette. Ved å se på Poisson-fordeling over ekstremhendelser og antallet hendelser ved gitte gjentakintervall, utledet Nilsen (2017) følgende ligning for beregning av årlig forventet skade

$$EAD = \int_0^{\infty} \frac{DF(T)}{T^2} dT \quad (2.11)$$

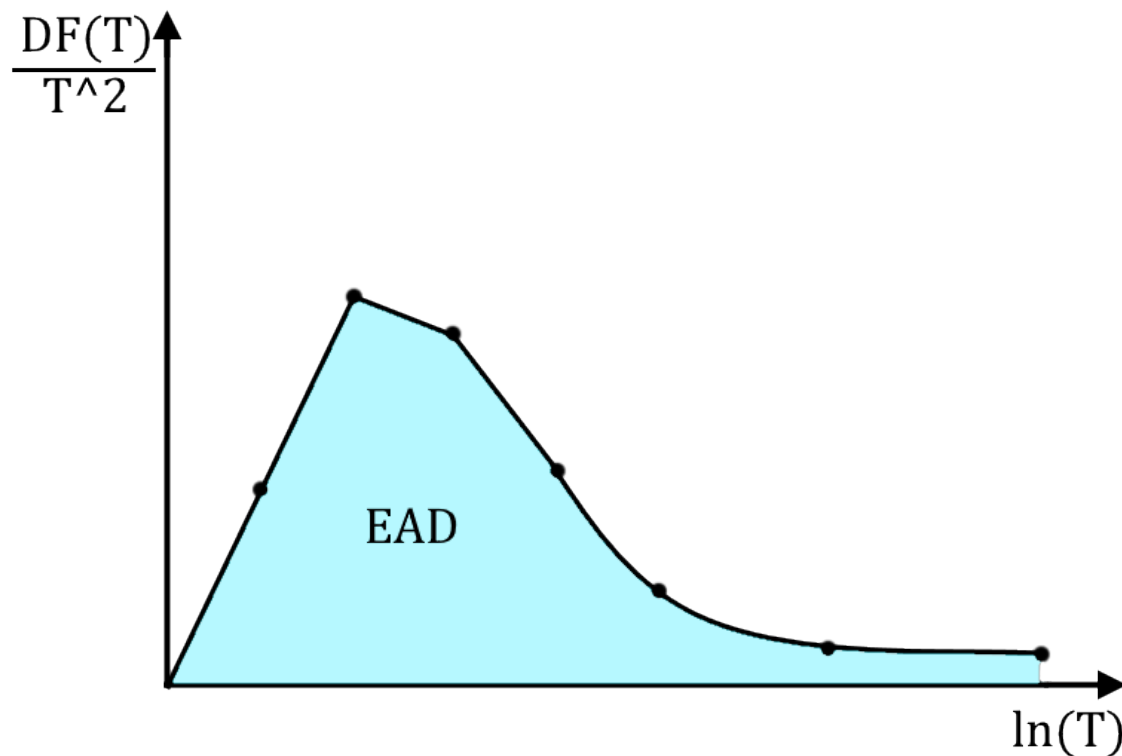
hvor

EAD	forventet årlig skade
$DF(T)$	skadefunksjon ved gjentakintervall T
T	gjentakintervall for nedbørshendelse

Det er interessant å påpeke at T^2 i telleren i ligning 2.11 viser at hendelser med svært stort gjentakintervall ikke nødvendigvis bidrar til stor EAD, noe som er forventet da de inntreffer svært sjeldent. En svakhet ved ligning 2.11 er at den ikke inkorporer et

klimapåslag i EAD-beregningen, mer om hvordan dette ble inkorporert i kapittel 3.

Det kan forventes at formen til funksjonen $\frac{DF(T)}{T^2}$ plottet mot logaritmisk T blir som følger (Olsen mfl., 2015).



Figur 2.4: Antatt form på $\frac{DF(T)}{T^2}$ plottet mot logaritmisk T , tegnet med inspirasjon fra (Olsen mfl., 2015)

Med definisjonen av EAD kan vi definere nytten U ved år t

$$U_t = EAD(t)_{\text{uten tiltak}} - EAD(t)_{\text{med tiltak}} \quad (2.12)$$

2.4.4 Diskonteringsrente

For å kunne beregne dagens verdi av fremtidige kostnader defineres en diskonteringsrente k . Som et eksempel vil 10000kr om 40 år ha nåverdien 2083kr ved en diskonteringsrente på 4%, mens ha nåverdien 3066kr ved diskonteringsrente på 3%. Diskonteringsrenta kan med andre ord være svært styrende for utfallet av NNV-analysen, og må av den grunn håndteres med forsiktighet. Valget av diskonteringsrenta er en komplisert økonomisk analyse som ligger utenfor denne oppgavens omfang. For å lese mer om valget henvises

det til NOU2012:16 (2012). NOU2012:16 (2012) anbefaler også følgende diskonteringsrenter

Tabell 2.5: Risikojustert diskonteringsrente klassifisert ut i fra levetiden til tiltaket

	0-40år	40-75år	fra 75år
Risikojustert rente	4 %	3%	2%

Det må påpekes at verdiene i tabell 2.5 er kun korrekte gitt at verdien av virkningene er korrekte. Dette betyr i effekt at eventuelle usikkerheter i beregningen av EAD ikke kan kompenseres for med diskonteringsrenta, men må håndteres på eget vis.

2.4.5 Usikkerhet

Det er stor usikkerhet knyttet til inndata i enhver kost-nytteanalyse. Inndata betegner eksempelvis markedspriser på materiell skadet ved flom (se avsnitt 2.4.2), grad av skade ved en flomsituasjon og flomutbredelse. For å gi en indikasjon på usikkerheten benyttes Monte Carlo simulering, hvor parametere over grad av skade ved en gitt dybde og lignende trekkes fra fordelinger i stedet for en fastsatt verdi for hver iterasjon av modellen. Det er vanlig praksis å kjøre rundt 10000 simuleringer med tilfeldige trekninger, men i teorien trenger man kun kjøre iterasjoner til punktet hvor variasjonen på dataene man får er innenfor et akseptabelt område, samtidig som halene i fordelingen dekkes godt.

Usikkerheten knyttet til flomutbredelsen kan ikke trekkes uniformt på lik måte som prisene, og usikkerheten må håndteres på andre måter.

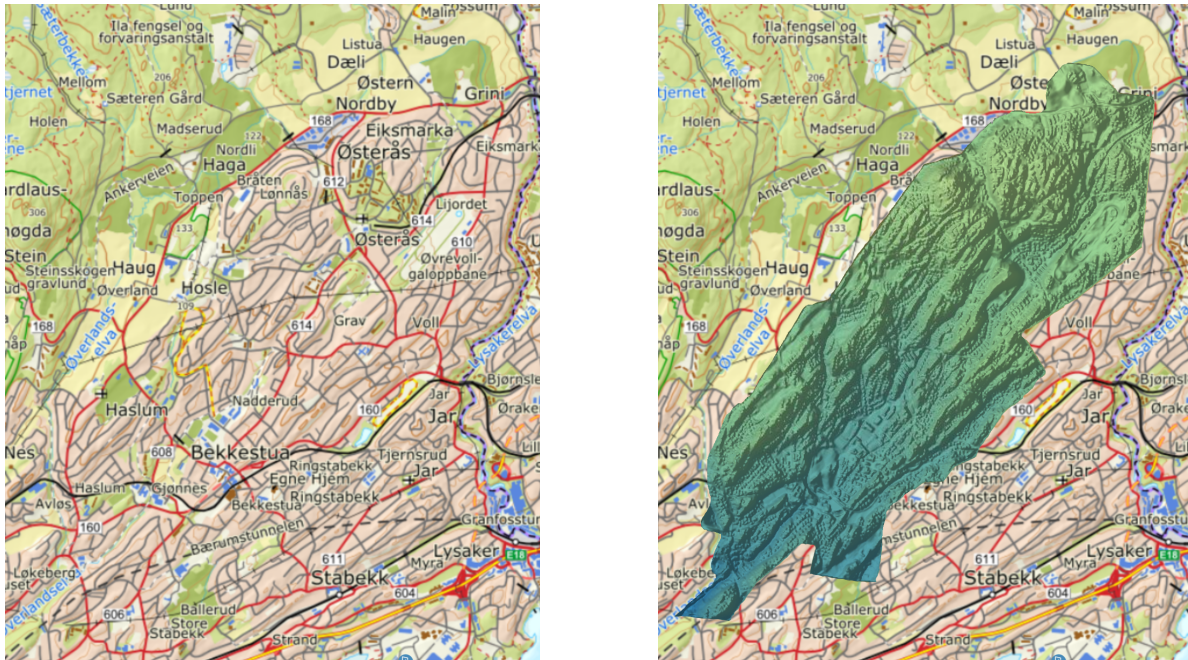
3. Metode

3.1 Introduksjon

I denne oppgaven benyttes to former for modellering. Først modelleres overflatevann ved en kombinert overflate og ledningsmodell i programmet MIKE FLOOD. Deretter benyttes resultatene fra overflatemodellen til å beregne forventet kostnad gjennom en egenprodusert kost-nyttmodell, som igjen tillater beregning av nytten til tiltak. Dette betyr at det er to sett med usikkerheter, først usikkerheten ved overflatemodellen, deretter usikkerheten ved kost-nyttmodellen. Dette gjør at resultatene fra kost-nyttmodellen vil være påvirket av usikkerheten i overflatemodellen. For at resultatene fra kost-nyttmodellen skal være best mulig er overflatemodellen kjørt med samme betingelser for alle modellerte nedbør, på den måten kan vi anta at usikkerheten knyttet til overflatemodellen er mer eller mindre konstant for hver flomhendelse.

3.2 Modelleringsområde

Modelleringsområde som er studert i denne oppgaven befinner seg på Nadderud i Bærum kommune (figur 3.1). Området kjennetegnes ved tett urban bebyggelse, hovedsaklig bestående av eneboliger med hageflekker, samt et tett knyttet vegnettverk.



Figur 3.1: Modellområdet på Nadderud med og uten terrengmodell over det modellerte nedbørfeltet

Feltet har en relativ høydeforskjell mellom øverst og nederst i feltet på rundt 100 meter, en total lengde på om lag 6 kilometer og et areal på omkring 16 kvadratkilometer. Som det kommer frem av figur 3.1 har feltet langstrakte parallelle rygger og nedsenkninger i nordøstlig retning, noe som er typisk for Oslo-feltet. Det er naturlig å forvente at vannet vil samles i nedsenkningene mellom ryggene, og at disse fungerer som naturlige flomveier.

3.3 MIKE FLOOD-modellen

MIKE FLOOD-modellen benyttet i denne oppgaven er lagd av Sweco på oppdrag fra Bærum kommune i 2017. Modellen er en koblet 1D-2D modell basert på rasterdata med 4x4 meter oppløsning. Modellen var av de første modellene av denne typen som ble utredet for Bærum kommune, og i 2017 var denne type modeller ganske nye i Norge. Det arbeides i dag med å opprette en ny MIKE FLOOD-modell for området, som skal utbedre svakheter i modellen fra 2017, men ettersom den nye modellen ikke ble ferdig i tide, benyttes den gamle modellen i denne oppgaven. Enkelte parametere ble endret på fra 2017-modellen, disse endringene samt en generell gjennomgang av oppbygningen og usikkerheten i modellen kommer i de neste avsnittene.

3.3.1 Teoretisk rammeverk

MIKE FLOOD er en samlet programvarepakke bestående av MIKE-programmene MIKE URBAN, MIKE11 og MIKE21. MIKE URBAN beregner ledningsnett, MIKE11 beregner kanalstrømning i en dimensjon, mens MIKE21 beregner overflatestrømning i to dimensjoner. Sammenkoblingen mellom de ulike pakkene gir som diskutert i avsnitt 2.3.1 en detaljert beskrivelse av flomutbredelsen i området.

Nedbør

Nedbøren benyttet i modellen baserer seg på IVF-kurver fra Blinderen målestasjon i Oslo. Kurvene ble hentet fra Norsk Klimaservice i mars 2019. Ettersom det var ønsket å modellere flere gjentaksintervall enn tilgjengelig fra Norsk Klimaservice ble lokasjon og skalaparameterne i ligning (2.1) bestemt ut i fra de tilgjengelige datapunktene. På denne måten kunne regnmengder fra gjentaksintervall som ikke vises på Norsk Klimaservice sine sider brukes.

I modellen ble det benyttet regn med følgende gjentaksintervall 5, 10, 15, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 år. For hvert av gjentaksintervallene ble intensitetsverdier ($L s^{-1} ha^{-1}$) beregnet for henholdsvis 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 og 360-minutters regnvarighet. Med disse tallene kunne deretter de symmetriske regnhyetogrammene konstrueres og benyttes i MIKE. Det hadde vært fordelaktig å definere enda flere modellerte nedbør med ulike gjentaksintervall, men hver modellkjøring av MIKE FLOOD tok over 20 timer å simulere, så det ble valgt ut et intervall som dekket det ønskede området av gjentaksintervall tilstrekkelig.

Nedbøren belastes direkte på overflaten i modellen, med den samme intensiteten over hele modelleringsområdet. Reelt sett er det sjeldent at et ekstremnedbør treffer med lik intensitet over et så stort område, så dette er en usikkerhet som må tas med videre.

Infiltrasjon

Som kjent fra avsnitt 2.1.2 benytter MIKE FLOOD to ulike modeller for infiltrasjon, henholdsvis netto infiltrasjon og konstant infiltrasjon med kapasitet. I denne oppgaven er sistnevnte modell benyttet. For å initiere de nødvendige parameterene i modellen (infiltrasjonsrate, porøsitet, mektighet, perkolasjonsrate og initiell vannmengde) er det benyttet en .dfs2 fil som tillater å definere parametere cellevis over et område (i likhet med en rasterfil). .dfs2 er en fil-type utviklet til bruk i MIKE.

Overflatekarakteristikk

Topografien benyttet ved modellering defineres som kjent gjennom en terrengmodell. Ved hjelp av terrengmodellen kan modellen bestemme retningen vannet i enhver celle tar, men den tar ikke høyde for hvilken strømmingsmotstand vannet vil oppleve. Derfor benytter MIKE FLOOD enten Chezy eller Mannings tall som ruhetsparameter for å definere strømmingsmotstanden. Cellene kan enten defineres med lik ruhetsparameter, eller med forskjellig parameter per celle, hvor ruhetsparameterne representeres cellevis gjennom et raster. I denne modellen benyttes Mannings tall som er bestemt ut i fra terrengtypene i modelleringsområdet.

Terrengmodellene klarer i mindre, eller ingen grad å fange opp nedbørstap som følge av gropmagasinering, det er en viss utilsiktet magasinering i områder hvor celler heller slik at vann samles i en forsenkning, men dette er i en mye større skala enn hva som vanligvis karakteriseres som gropmagasinering.

3.3.2 Grunnlagsdata

Følgende grunnlagsdata ble benyttet i modellen

Tabell 3.1: Beskrivelse av grunnlagsdataen benyttet ved utredelsen av overflatemodellen (hentet og modifisert fra Friborg og Deggerdal (2017))

Grunnlag	Leverandør	Dato
Terrengmodell	Bærum kommune	Laserdata fra 2013
FKB	Bærum kommune	August 2017
IVF-kurver	Meteorologisk institutt	August 2017
Nedbørsdata for 2016 og 2017	Bærum kommune	September 2017
Ledningsnett og veisluk	Bærum kommune	August 2017
Ledningsnettmodell	Bærum kommune / ROSIM	August 2017
Registrerte hendelser fra regn 6. august 2016	Bærum kommune	August 2017
Løsmassekart	NGU	September 2017

3.3.3 Kalibrering

Kalibreringen av modellen ble utført ut i fra hendelsen sjette august. Fem områder som opplevde store problemer på flomdagen ble sammenlignet opp mot modellresultatene. Sammenligningene gikk ut på å identifisere kummer hvor vann strømmet ut på overfla-

ten, mengder vann i områdene og strømningsmønsteret til vannet.

Kalibreringen viste at modellen fungerte godt enkelte steder og ikke fullt så godt andre steder. Av de fem områdene som ble undersøkt stemte modellen godt på tre av stedene. De resterende to områdene viste modellen for mye vann. Konklusjonen av kalibreringsarbeidet var at det bør jobbes videre med justering av modellen slik at den stemmer enda bedre med observerte hendelser, noe som utføres i den nye modellen, men ikke er kommet med i denne oppgaven.

3.3.4 Usikkerhetsmomenter

Terrengmodellen er som vist i tabell 3.3.2 fire år eldre enn den resterende dataen og tidspunktet for modelleringen. Dette kan føre til at enkelte områder har endret arealmessig karakter i løpet av disse årene, som kan ha betydning for hvilke veier flomvannet tar.

Oppløsningen på dataen benyttet i modellen er som tidligere nevnt 4x4 meter. Dette betyr at det er fare for at topografiske detaljer slik som fortauskanter ikke blir ordentlig representert i modellen. I tillegg vil objekter som hus ha taggete kanter som følge av cellerepresentasjonen. Det er vanskelig å kvantifisere betydningen av dette på modellresultatene, men er absolutt noe som bør tas med inn i en analyse av resultatene.

Ledningsmodellen inneholder ikke sluk og ledninger mindre enn 160mm. Dette betyr at finere detaljer rundt overføringen av vann mellom overflate og ledningsnett ikke fanges opp. Som nevnt i avsnitt 2.3.4 overføres også vannet mellom overflate og ledningsnett i MIKE FLOOD gjennom kummer.

Overføringsgrensen mellom kum og overflate, samt infiltrasjonsverdiene ble det i ettertid konkludert med at var satt for lavt med henholdsvis 30 L s^{-1} og 12 mm h^{-1} . Disse verdiene ble oppjustert til henholdsvis 50 L s^{-1} og 18 mm h^{-1} i denne oppgaven.

3.4 Kost-nyttmodell

Kost-nytte modellen benyttet i denne oppgaven er egenutviklet, med inspirasjon fra Nils Roar Sælthuns Nytte-kost analyse som er utviklet for fluviale flommer for NVE. I senere tid har derimot Sælthun (2018) og Hoven mfl. (2018) tilpasset modellen til bruk ved urbane pluviale flommer.

I Sælthuns modell må antall flomutsatte objekter (bygninger, veier, jorder o.l.) telles opp og føres inn i et Excel-ark som beregner kostnader og nytte. Opptellingen av flomutsatte

objekter ved pluviale flomhendelser er krevende arbeid, ettersom det ofte må utføres manuelt ved opptelling, men også fordi klassifiseringen av hvorvidt en bolig utsettes for flomskade må utføres skjønnsmessig. Målet med modellen i denne oppgaven var derfor å undersøke hvorvidt denne opptellingsprosessen kunne automatiseres ved å bruk av FKB-data og flomanalyser til å automatisk klassifisere hvilke objekter som blir utsatt for flomskade. I dette avsnittet presenteres derfor grunnlaget for hvordan opptellingen og klassifisering av flomskade utføres.

3.4.1 Programvare

Modellen tar utgangspunkt i to programmer, ArcGIS og Python. ArcGIS benyttes for å tilpasse FKB-dataen, hovedsaklig ved definering av geolokasjon og dimensjoner på rasteret. I tillegg benyttes Python-pakken ArcPy ¹, som er en del av ArcGIS, til å gjøre raster-filer om til matriser som lar seg regne på i Python.

Etter at rasterdataene er initiert som matriser i Python benyttes egne funksjoner til å kvantifisere flomutsatte objekter. Beskrivelse av funksjonene som Python-skriptet er bygget av finnes i appendiks A.

3.4.2 Grunnlagsdata

Data over infrastruktur og bygninger som er benyttet i kost-nyttmodellen kommer fra FKB-data fra Bærum kommune. Flomkartet er generert via MIKE FLOOD. FKB-data er svært detaljert og inneholder ekstremt mye informasjon. Følgende data er benyttet i modellen

Tabell 3.2: Beskrivelse av innholdet i FKB-dataen benyttet i modellen

FKB-fil	Beskrivelse
Bygninger Anneks	Beskriver alle mindre bygninger knyttet til en bolig, eksempelvis garasjer, vedskjul og lignende
Boligbygg	Beskriver alle boliger, både blokker og ene-boliger
Brann og ambulansestasjon	Beskriver brann- og ambulansestasjoner

¹<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/arcpy/what-is-arcpy-.htm>

Tabell 3.2: Beskrivelse av innholdet i FKB-dataen benyttet i modellen

FKB-fil	Beskrivelse	
Forretninger	Beskriver all bygningsmasse som driver forretninger, kan eksempelvis være matbutikk, klesbutikker og lignende	
Helseinstitusjoner	Beskriver helseinstitusjoner som gamle hjem, legekontor, sykehus og lignende	
Hotell og restaurant	Beskriver bygninger med hotell og/eller restauranter	
Industri	Beskriver bygningsmasse som driver industri	
Kultur og idrett	Beskriver bygninger knyttet til kultur og idrett	
Skole	Beskriver bygninger knyttet til skole	
Barnehage	Beskriver bygninger knyttet til barnehager	
Veger	Fylkesveg	Beskriver fylkesveger
	Kommunal veg	Beskriver kommunale veger
	Privat veg	Beskriver private veger som innkjørsler og
Bane	T-bane	Viser T-bane sporene i området

3.4.3 Kostnad og sårbarhetsdata

Kostnadstallene benyttet i denne oppgaven er hentet fra NVEs kost-nytteverktøy (Sæltun, 2018). Verktøyet er utviklet med hensyn på fluviale flommer (elveflommer), men ble i 2018 også benyttet, med enkelte modifikasjoner, som verktøy ved urbane pluviale flommer (Hoven mfl., 2018).

Modellen benytter byggekostindeksen (BKI) fra SSB til å finne hva det koster i snitt å bygge en enhet (eksempelvis kvadratmeter) av et objekt (eksempelvis bolighus). Deretter bestemmes kostnaden ved å skalere enhetsprisen med en sårbarhetsfaktor som beskriver andelen av byggeprisen som skades ved en flomsituasjon. Sårbarhetsfaktoren er et tall mellom 0 og 1, hvor 1 tilsier at skadekostnaden er tilsvarende kostnaden av å bygge nytt, sårbarhetsfaktoren bestemmes ut i fra flomdybde. I tillegg til byggekostin-

deksen benyttes konsumprisindeksen (KPI) til å finne gjennomsnittlig verdi av innbo. Kostnadene som påløper for et objekt (bygning eller vei) kan dermed uttrykkes ved

$$K_{\text{objekt}} = (BKI_{\text{objekt}} + KPI_{\text{objekt}}) \cdot A_{\text{objekt}} \cdot S_{\text{dybde}} \quad (3.1)$$

Her representerer K_{objekt} kostnaden knyttet til et flomutsatt objekt, BKI_{objekt} og KPI_{objekt} viser til byggekosten og innbokosten (per areal) gitt at objektet har innbo, A_{objekt} er arealet til objektet og S_{dybde} er sårbarheten ved en gitt dybde.

Detaljert oversikt over både kostnad- og sårbarhetstall benyttet i modellen finnes i appendiks B, men et utdrag er gjengitt i tabell 3.4.3. Hoven mfl. (2018) fant at sårbarhetstallene benyttet ved fluviale hendelser generelt sett var for høye, og reduserte de i sin modell. Dette er adaptert i denne modellen også.

Tabell 3.3: Kostnader og sårbarhetsverdier for kategorien bygninger, hentet fra Sælthun (2018), justert via Hoven mfl. (2018)

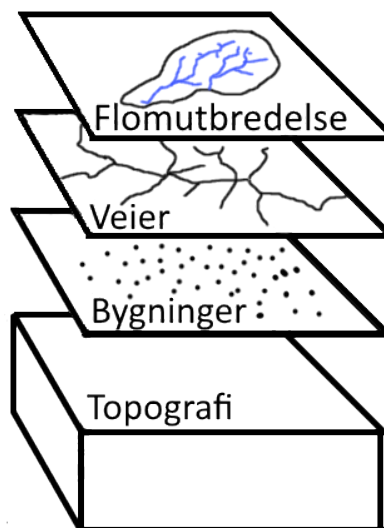
Type	Sårbarhetstall ved dybde			Pris per m ²		Totalpris per m ²
	U.etasje ^a	0-1 m ^b	>1 m ^b	Byggekost	Innbo	
Anneks	0.02	0.3	0.5	5601	1120	6721
Barnehage	0.02	0.2	0.3	21469	8588	30057
Boligbygg	0.02	0.2	0.4	21469	10735	30523

^a Ved underetasje så settes en vanddybde som antar at gir kjelleroversvømmelse

^b Definert 0 som sokkelen av grunnmuren på huset, dette må tas høyde for

3.4.4 Beregningsmetodikk

For at detaljbeskrivelsen av prosessen bak beregningsmetodikken skal gi mest mening er det fornuftig å begynne med hovedprinsippet i grove drag. I figur 3.2 vises den generelle tankegangen bak bestemmelsen av flomutsatte objekter, hvor man utnytter flere rasterlag med informasjon om infrastruktur, bygning etc, og et med flomutbredelse, representert ved maksimalmengden på cella gjennom simuleringsperioden. Tankegangen er da at en celle (i, j) i infrastruktur- og bygningsrasterene kan sammenlignes opp mot samme celle (i, j) i flomutbredelsesrasteret og antall steder hvor det er overlappende flom og infrastruktur eller bygninger telles opp.



Figur 3.2: Visualisering av ulike rasterlag med informasjon rundt infrastruktur, bygning og flomutbredelse over samme topografi

Ettersom raster må, i likhet med en matrise, defineres som en firkant vil deler av rasteret ligge utenfor modelleringsområde (med mindre modelleringsområdet er firkantet), men ettersom flomutbredelsen fra MIKE-modellen kun defineres på de cellene i rasteret som er en del av modelleringsområdet utgjør ikke den overflødige dataen et problem, da beregningene kun foregår der hvor det er flomvann.

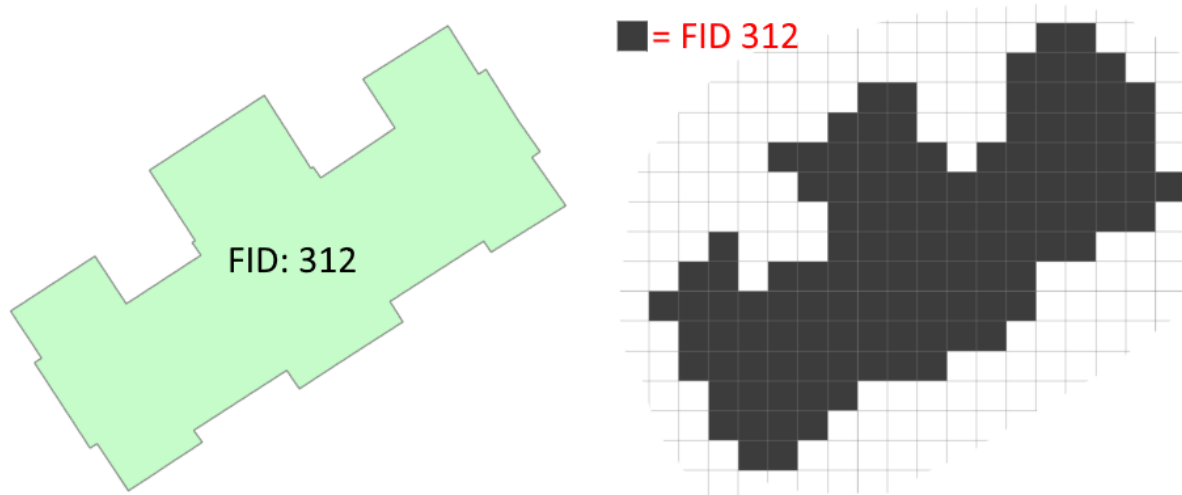
Med hovedprinsippet til grunne kan den generelle prosessen gjennomgås i detalj. For å best kunne beskrive prosessen bak beregningsmetodikken er det fornuftig å dele opp prosessen på følgende måte

- **Forberedelse av data i ArcGIS**
- **Initiering av data i Python**
- **Datavalidering**
- **Kvantifisering av flomutsatte objekter**
- **Kostnadsberegning**
- **Monte Carlo simuleringer**

Forberedelse av data i ArcGIS

Modelleringsprosessen begynner med å åpne FKB-data i ArcGIS. FKB-data kommer i utgangspunktet på vektorformat og må konverteres til raster-formatet .tif. Ved konverteringen påses det at geografiske koordinater, celledimensjon og antall rader og kolonner (geografisk og dimensjonell informasjon) er likt for hvert raster.

FKB-data på vektorformat har egne tabeller med informasjon for hvert objekt, eksempelvis defineres hvert objekt med en unik tallmessig ID (kalt FID), samt informasjon som eksempelvis byggeår, postadresse, areal og lignende. Raster-data har ikke samme mulighet til å lagre informasjon, og er begrenset til å lagre en verdi for hver celle (i, j) i matrisen. Raster-data kan ha flere "lag" med matriser kalt "bands", men det er ikke benyttet i denne oppgaven. For at rasteret skal kunne representere den samme geografiske utbredelsen, samtidig som at objektene er unikt identifiserbare må summen av celler $\sum_{\text{objekt}} (i, j)$ som utgjør objektet defineres med lik, unik verdi for hver av cellene. Prinsippet er vist i figur 3.3.



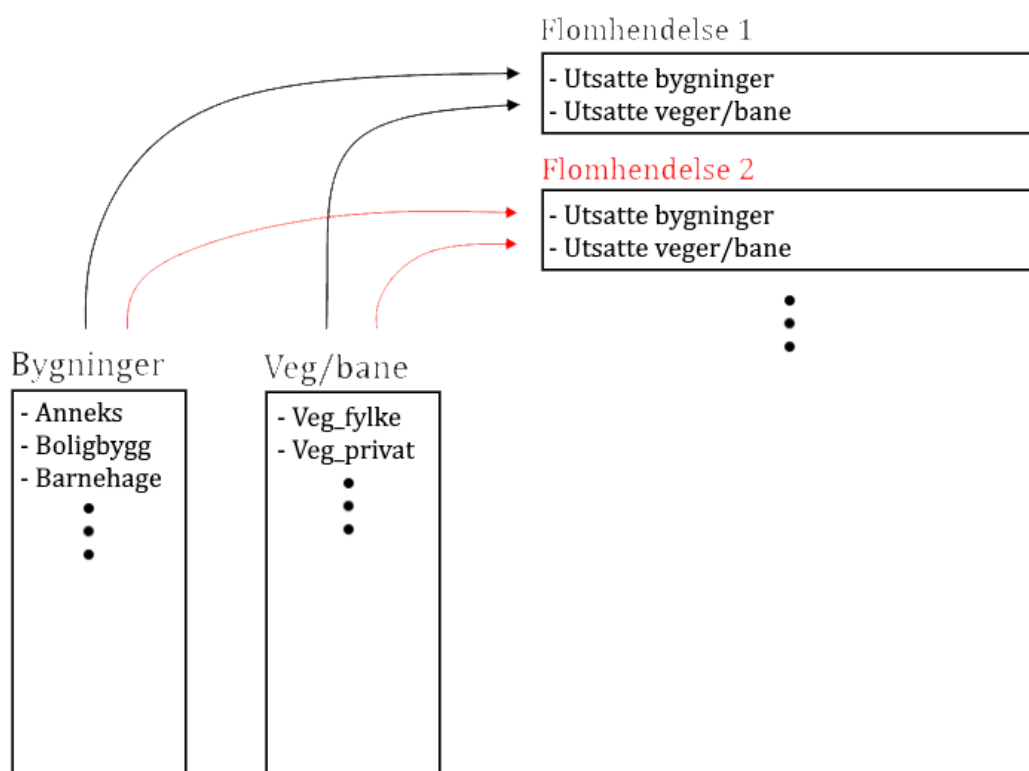
Figur 3.3: Visualiseringen av konverteringen mellom vektor-format (venstre) til raster-format (høyre). Hver celle i rasteret tilegnes FID-verdien fra vektordataen

For å bestemme en unik verdi for hver av cellene i et objekt benyttes kolonnen FID fra vektor-formatet. Disse tallverdiene benyttes som unike nøkler for hvert objekt i resten av beregningene. Denne prosessen utføres for alle typer FKB-data som er av interesse, i utgangspunktet er det alle typene (Anneks, Boligbygg osv) i tabell 3.4.2. Flomrasteret kommer allerede i riktig format fra MIKE, og det trengs i utgangspunktet ikke å gjøre noe spesielt med det i ArcGIS.

Initering av data i Python

Etter at dataene er ferdigbehandlet i ArcGIS kan rasterne lastes inn i Python ved ArcPy-funksjonen **"Raster()"** som gir Python tilgang til rasterfilen. Deretter lagres geografisk og dimensjonell informasjon til rasterne (mer om dette under avsnitt 3.4.4). Avslutningsvis i initieringen benyttes ArcPy-funksjonen **"RasterToNumpyArray()"** til å overføre rasteret til en matrise som det kan utføres cellevis beregninger på i Python.

Den ovennevnte prosessen utføres for hvert raster som sendes til modellen. For å forenkle beregningsprosessen senere lagres matrisene over bygningsdata og veg/bane-data i egne Python klasser som, uten å gå i detalj på programmeringsbiten, gjør det enklere å utføre spesifikke operasjoner på matrisene, samtidig som de får en spesifikk lagringsplass. Flomdataen defineres også i unike klasser, en for hver flomhendelse. Prinsippet er illustrert i figur 3.4, hvor klassene er representert ved rektangler.



Figur 3.4: Eksempler på inndelinger i klasser representert ved rektangler. Pilene viser mulig interaksjon mellom klassene mens prikkene viser at klassene/innholdet kan utvides.

Datavalidering

Hvis rasterne har lik geografisk og dimensjonell informasjon vil hver celle (i, j) representere samme geografiske område. Det er kritisk at denne relasjonen er den samme for at flominformasjonen representeres riktig geografisk sett i modellen. Derfor lagrer modellen den geografiske og dimensjonelle informasjonen til det første rasteret som lastes inn. Påfølgende rasterer som lastes inn sammenlignes deretter mot informasjonen fra det første rasteret. Dersom det er en uoverstemmelse returneres en feilmelding og modellen lar seg ikke kjøre.

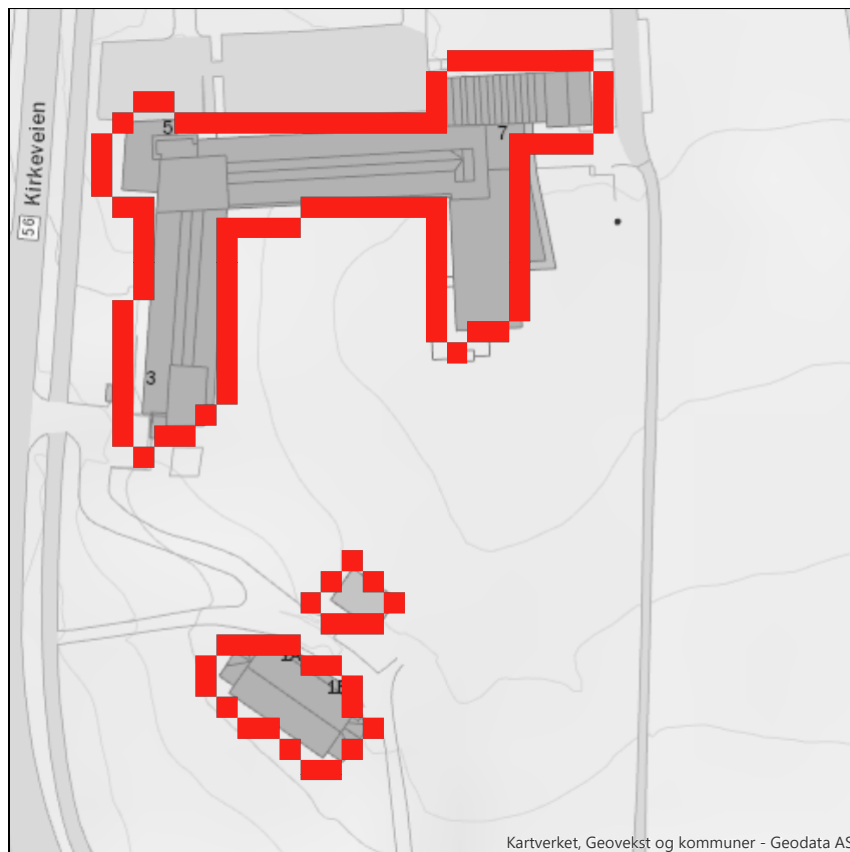
Kvantifisering av flomutsatte objekter

Selve nøkkelen til flommodellen ligger i å kvantifisere hvilke objekter som treffes av flomvann, men også hva som tilsier at objektet tar skade av flomvannet. For enkelte objekter, slik som biler, eksisterer det såkalte dybde-skade relasjoner som gjør det lett å kvantifisere skaden ut i fra dybde, mens for eksempelvis boligbygg er det en iboende usikkerhet rundt skaden en viss vanddybde gir, som også varierer mellom hver bygning. Årsakene til denne iboende usikkerheten kan eksempelvis være hvorvidt en bygning har kjeller, hvilken byggemetode som er benyttet, hvor starter første etasje, hvor dyrt er inventaret og lignende. For å regne med denne usikkerheten benyttes Monte Carlo analyse, mer om det under punkt [3.4.4](#).

Etter at de ulike dataene er representert som matriser i Python kan kostnadskvantifiseringen starte. Metodikken går ut på å iterere over alle cellene i flomhendelsesmatrisen. For hver celle (i, j) i flomhendelsesmatrisen sjekkes den korresponderende cellen (i, j) i FKB-matrisen(e). Dersom cellen i FKB-matrisen(e) inneholder et objekt (effektivt sett at celleverdien ikke er lik 0) lagres cellenverdien i celle (i, j) fra FKB-matrisen(e) og den korresponderende flomdybden i en egen liste. En liste lagres per type FKB-data som er med i analysen, eksempelvis en for Anneks, en for Boligbygg osv. Ettersom celleverdiene i FKB-rasteret representerer unike objekter har vi nå opprettet en liste hvor alle flomutsatte objekter lagres.

Ettersom bygninger har en høyde i terrengmodellen benyttet i flommodellen vil det ikke være vann direkte på bygningscellene. Derfor er det introdusert en omriss-funksjon i modellen, som definerer bygningene ut i fra cellene rundt bygningen (med samme FID-verdi bygningscellene er definert utfra) (figur [3.5](#)). På denne måten kan modellen i stedet sjekke hvorvidt det er vann på celler rundt bygningen.

Selv om et objekt har vann på en celle betyr det ikke nødvendigvis at det oppstår skade. Derfor er det lagt inn mulighet til å sette hvilken flomdybde (D_{skade}) som skal



Figur 3.5: Eksempel på cellene som danner omrisset rundt en bygning, ved celleoppløsning på 4x4 meter

til for at skade oppstår. Dette fungerer ypperlig dersom det regnes med at vann på cella fører til skade, noe som er tilfellet for veg og bane. Dette er ikke tilfellet ved bygninger, som er definert av cellene rundt bygningen. Derfor er det også lagt inn en ekstra andelsbetingelse ϕ for bygninger som sier at en bygning kun utsettes for flom, hvis en viss andel (eksempelvis 50%) av omrisset er truffet av vann. Fordelen ved å gjøre dette er at man har mulighet til å unngå og telle bygninger som kun har få celler på omrisset truffet av vann, noe som det ikke er uvanlig at skjer som følge av unøyaktigheter i terrengmodellen.

Kostnadsberegning

Med listene over flomutsatte objekter kan så kostnadsberegning utføres. Ettersom ligning (3.1) krever hva slags objekt vi har (defineres av lista i seg selv), hvilken sårbarhet (kan hentes ut i fra dybden) og areal (som kan beregnes ettersom vi har antall celler og cellestørrelse) kan den påløpte kostnad per objekt beregnes. For hus som har flomvann på flere celler rundt bygningen defineres sårbarhetsverdien ut i fra cellen med mest vann. Kostnaden per objekt lagres så sammen med regnhendelseklassen, slik at den er knyttet opp mot regnhendelsen. Denne metoden gir flere muligheter til å hente ut kostnadsdata,

eksempelvis per objekt eller per FKB-type.

Monte Carlo simuleringer

For å prøve og modellere usikkerheten rundt kostnadene er modellen tilrettelagt slik at sårbarhetsverdiene trekkes fra uniforme fordelinger. I modellen er intervallene på fordelingene satt, skjønnsmessig sett, ± 0.1 i hver retning av sårbarhetstallene hentet fra Sælthun (2018) og Hoven mfl. (2018) (tallene finnes også i appendiks B). I tillegg så modelleres den iboende usikkerheten rundt hvorvidt et hus blir oversvømt ved å trekke andelsparameteren ϕ fra en uniform fordeling mellom 0 og 1, eller andre intervaller definert mellom 0 og 1.

Trekning av nye sårbarhetsverdier og ϕ skjer før kostnadsberegningen til hvert objekt (bygning, veg), slik at nye parametere påløper for hvert objekt. Det betyr at ved en simulering trekkes det nye verdier n ganger, der n representerer antall objekter som er flomutsatt. Deretter kan det spesifiseres m antall kostnadsberegninger, slik at spredningen i kostnadsresultater og dermed usikkerheten kan modelleres.

3.4.5 Kalibreringsparametere

Gjennom avsnitt 3.4 er det definert enkelte parametere som lar brukeren av modellen justere hvordan kostnadene påløper. Ettersom disse parameterene er svært viktige i et eventuelt kalibreringsarbeid gis det en kort oppsummering av hver parameter.

Kostnad og sårbarhetstall

Det antas i utgangspunktet at kostnadstallene og sårbarhetstallene hentet fra Sælthun (2018) og Hoven mfl. (2018) er gode. Allikevel kan det tenkes at det er fornuftig å endre på enkelte kostnadstall dersom det foreligger bedre data på et senere tidspunkt, eller i et spesifikt prosjekt. I tillegg trekker modellen sårbarhetstall ut i fra intervaller for å modellere usikkerheten. Disse intervallene kan også justeres av brukeren.

Dybdegrense for flomskade ved D_{skade}

Ettersom flommodellen genererer nedbør, og dermed avrenning over hele modelleringsområdet, vil alle celler oppleve vann på et eller annet tidspunkt. For å unngå og beregne alle cellene som har litt vann kan det defineres en generell grense for når flomskader

oppstår, gitt ved D_{skade} . Denne parameteren sier effektivt sett at alle celler som har mindre enn D_{skade} vann ikke tas med i beregningen.

Andelsparameteren ϕ

For å kunne ta høyde for feil i terrengmodellen som kan gi enkelte celler med unaturlige forsenkninger nær bygninger, samt å kunne definere hvor stor andel av omrisset til en bygning som må dekkes av vann for at det skal kategoriseres som skadet av flom er "andelsparameteren" ϕ innført. ϕ treskkes fra et intervall $[a,b]$ hvor a og b er nedre og øvre grense, som defineres av brukeren, for den uniforme fordelingen som trekkes i Monte Carlo analysen.

3.4.6 Fremtidig kostnad

Gitt antagelsen om log-lineær sammenheng mellom gjentaksintervall T og skade (avsnitt 2.4.2) kan overflatemodellen benyttes til å kalibrere interpolasjonskonstantene a og b i ligning 2.8. For å få et godt estimat på interpolasjonskonstantene bør skaden $DF(T)$ bestemmes ved flest mulige gjentaksintervall T , med så stor spredning av T i antall år som mulig.

Problemet med tilnærmingen kommer ved beregning av fremtidig skade, ettersom den forventede årlige skaden forventes å øke hvert år som følge av økende nedbør (avsnitt 2.4.3). For å kunne beregne kostnad i år t opp til år N må den hydrauliske modellen kjøres på nytt for n gjentaksintervall, der n er antall gjentaksintervall i modellen, med kalibrert regnmengde for hvert år t . Gitt et ønske om å beregne den forventde årlige skaden hundre år frem i tid ville dette bety $100 \cdot n$ modellkjøringer - som er svært tidskrevende og urealistisk å gjennomføre.

Ettersom sammenhengen mellom regnmengde og kostnad forblir konstant, foreslås det heller å regne om fremtidens nedbørshendelser til tilsvarende gjentaksintervall per i dag, som deretter kan brukes på kostnadsligningen (2.8) funnet fra dagens flomresultater. For å gjennomføre dette foreslås følgende funksjon $T_0(P_t(T))$ som definerer hvilket gjentaksintervall et regn P med gjentaksintervall T i år t ville hatt i dag. Sammenhengen mellom gjentaksintervall og nedbørsmengde kan gis ved

$$T_0(P_t(T)) = c \cdot e^{d \cdot P_t(T)} \quad (3.2)$$

hvor

c, d interpolasjonskonstanter

$P_t(T)$ regnmengden ved gjentaksintervall T for år t

Videre antas det at regnmengden øker lineært hvert år, som betyr at vi kan definere følgende funksjon for $P_t(T)$

$$P_t(T) = \left(\frac{KF - 1}{N} t + 1 \right) P_0(T) \quad (3.3)$$

hvor

KF klimafaktor

N antall år frem i tid

t hvilket år frem i tid, opp til N

$P_0(T)$ funksjon som finner regnmengden i dag ved gjentaksintervall T

Sammenhengen mellom nedbør og gjentaksintervall er log-lineær og kan i likhet med ligning 2.8 representeres på følgende måte

$$P_0(T) = f \cdot \ln(T) + g \quad (3.4)$$

Ved å slå ligning (2.8, 3.2, 3.3, 3.4) sammen kan vi finne en funksjon for $DF(t, T)$

$$DF(t, T) = a \cdot \ln\left(c \cdot e^{d \cdot \left(\frac{KF-1}{N}t+1\right)(f \cdot \ln(T)+g)}\right) + b$$

Som forenkles til

$$DF(t, T) = a \left(\ln(c) + d \left(\frac{KF - 1}{N} t + 1 \right) \left(f \cdot \ln(T) + g \right) \right) + b \quad (3.5)$$

For at ligning (3.5) skal gjelde antas det, som sagt, log-linear sammenheng mellom gjentaksintervall T og skade ved urbane pluviale flommer, dette er en vanlig antagelse innenfor hydrologi generelt (Olsen mfl., 2015). I tillegg antas det at resultatene fra flommodellen er representative for et bredt spekter av gjentaksintervall T .

3.4.7 Nytteberegning

Som presentert i avsnitt 2.4.3 foregår nytteberegningen ved beregning av NNV. Som vist i ligning (2.10) er det en forutsetning for å kunne regne på nåverdien at nytten U_t kan beregnes over levetiden til tiltaket. Ettersom nytten er definert som sparte forventede årlige kostnader (EAD) ved et tiltak (ligning (2.12)) kan flommodellen benyttes til å definere ligning (3.5) for en situasjon med tiltak, og en situasjon uten tiltak. Deretter

kan beregningen av EAD utføres for hvert år t opp til levetiden til tiltaket.

$$EAD(t) = \int_0^{\infty} \frac{DF(t, T)}{T^2} dT \quad (3.6)$$

med denne definisjonen av utviklingen av forventede årlige kostnader kan nåverdiberegningen defineres ved

$$NNV = -I_0 + \sum_{t=0}^n \frac{EAD_{\text{medtiltak}}(t) - EAD_{\text{utentiltak}}(t)}{(1+k)^t} \quad (3.7)$$

4. Resultater

I dette kapitlet presenteres resultatene funnet fra kost-nyttmodellen sammen med nødvendig bakgrunnsinformasjon, som resultater fra flommodelleringen og informasjon over bebyggelsen i modelleringsområdet. Finans Norge har bidratt med skadedata fra Bærum kommune, knyttet til overvannskader. Dataene er ikke mer detaljert enn på kommunalt nivå, av hensyn til personvern. I tillegg inneholder skadedataen kun oversikt over skadehendelser knyttet til bygninger. Derfor vil skadene knyttet til bygninger settes i fokus i denne resultatdelen.

Resultatene fra kost-nytte analysen deles i to, hvor første del legger fokus på følsomhetsanalyse av kost-nytte modellen, mens den andre delen bruker skadedataene fra Bærum, inkludert hendelsen sjette august, til å vise hvordan modellen korresponderer med en reell hendelse.

Før resultatene fra kost-nytte modellen presenteres gis en gjennomgang av flomresultatene funnet i overflatemodellen. Deretter legges skadekostnadstallene fra FinansNorge til grunn før resultatene fra kost-nytte analysen presenteres avslutningsvis.

4.1 Bakgrunnsdata fra modelleringsområdet og Bærum kommune

For å kunne analysere resultatene fra kost-nytte modellen er det viktig å ha bakgrunnsdataen over modelleringsområdet klart for seg. Derfor presenteres to tabeller (tabell 4.1 og 4.3) som viser antall bygninger i Bærum kommune, samt skadedata for Bærum kommune fra Finans Norge.

Tabell 4.1: Antall bygninger i modelleringsområdet hentet fra FKB-dataen, samt antall bygninger kategorisert som "boliger" i Bærum kommune

FKB-data over modelleringsområdet		Bærum kommune
Anneks	4875	
Boligbygg	7601	50871 ^a
Brann og ambulansestasjon	1	
Forretninger	73	
Helseinstitusjoner	13	
Hotell og restaurant	7	
Industri	154	
Kultur og idrett	47	
Skole	70	
Barnehage	34	
Totalt	12875	

^a Hentet fra <https://www.ssb.no/statbank/table/06265/tableViewLayout1/>

Tabell 4.3: Skadedata knyttet til "vanninntregning utenfra" over Bærum kommune fra de siste 10 år (2008-2018). Kostnadene er gitt i nominelle kroner, og inkluderer ikke egenandel. Skadene fra hendelsen sjetten august 2016 er fremhevet

År	Totalt		Hvorav 060816	
	Antall	Kostnad i 1000kr	Antall	Kostnad i 1000kr
2008	250	8 298		
2009	165	5 313		
2010	218	5 998		
2011	331	13 466		
2012	184	4 774		
2013	261	7 363		
2014	295	7 001		
2015	342	11 213		
2016	1564	225 486	872	183 332
2017	419	15 367		
2018	389	11 771		

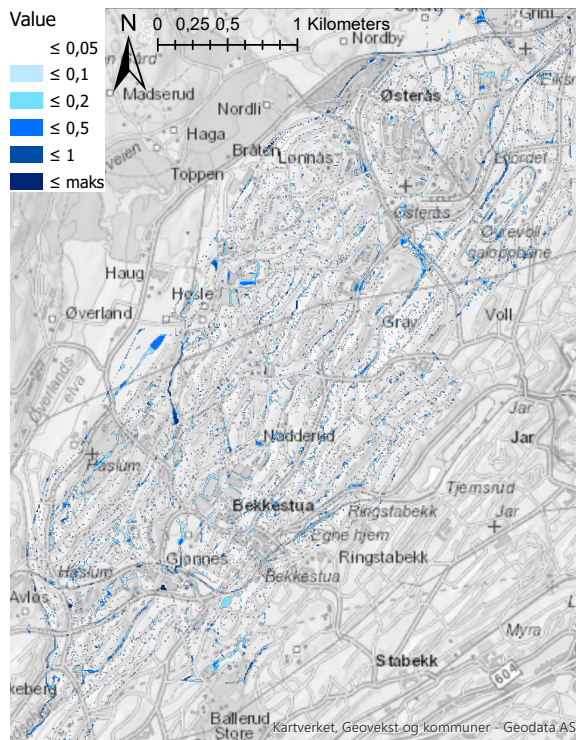
Grunnlaget for tallene i tabell 4.3 er skader meldt til forsikringselskapene av forsik-

ringstakerne. Finans Norge estimerer at de dekker 85% av det norske markedet innenfor forsikring. Av dette tallmaterialet er det kun bygninger/innbo med brannforsikring som er inkludert, bygninger eid av staten er dermed ikke inkludert da de er selvassurandør for egne bygg. Tallene inkluderer ikke egenandelen (4000-5000kr for privatpersoner, høyere for næring), mens beløpene er stipulert til hva det er anslått at kostnaden koster å utbedre, selv om ikke skaden er fullt utbetalt til håndverker eller kunde.

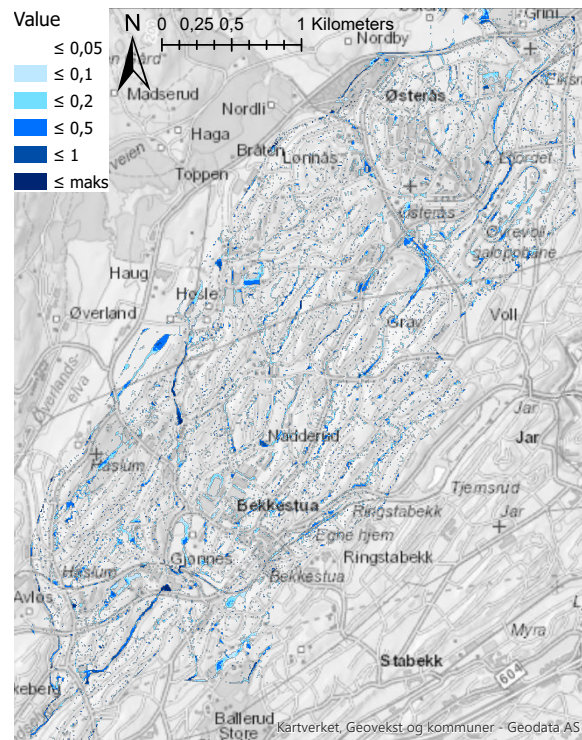
Vanninntregning utenfra er delt opp i vanninntregning utenfra - over grunn og vanninntregning utenfra - gjennom grunn. Ved vanninntregning over grunn definerer Finans Norge ”Omfatter vanninntregning gjennom de delene av bygget som har en ytterside mot friluft over terreng, dvs. gjennom yttertak og yttervegger. Omfatter også inntregning fra takrenner, utvendig og innvendig taknedløp.” mens det ved vanninntregning gjennom grunn defineres ”Omfatter vanninntregning gjennom de delene av bygget som er under terreng, dvs. gjennom grunnmur under bakkenivå. Omfatter også inntregning fra avløpsrør for overflatevann, taknedløp og drensledning.” (FinansNorge, 2011).

4.2 Flomutbredelse ved ulike gjentaksintervall

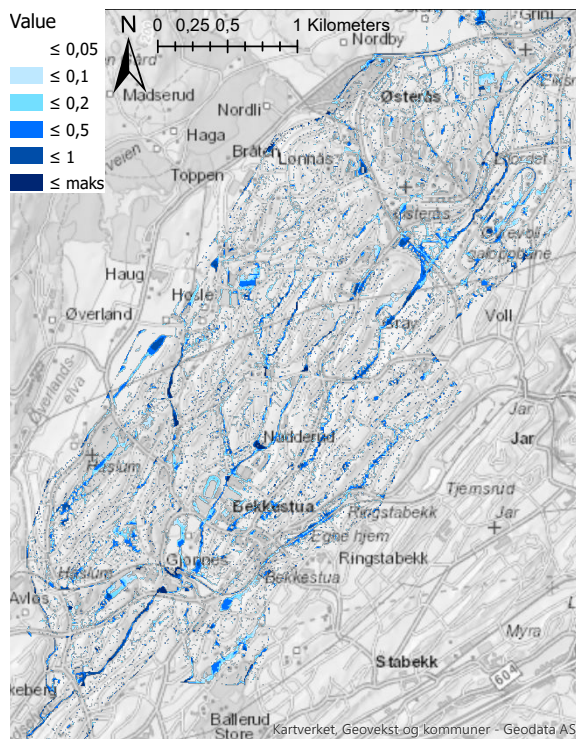
Resultatene som kommer fra overflatemodellen representeres ved den maksimale vannstanden som har funnet sted i en celle på et punkt i simuleringen. Alle resultatene finnes i appendiks C, men resultatene for 5, 10, 50 og 100-års gjentaksintervall gjengis her.



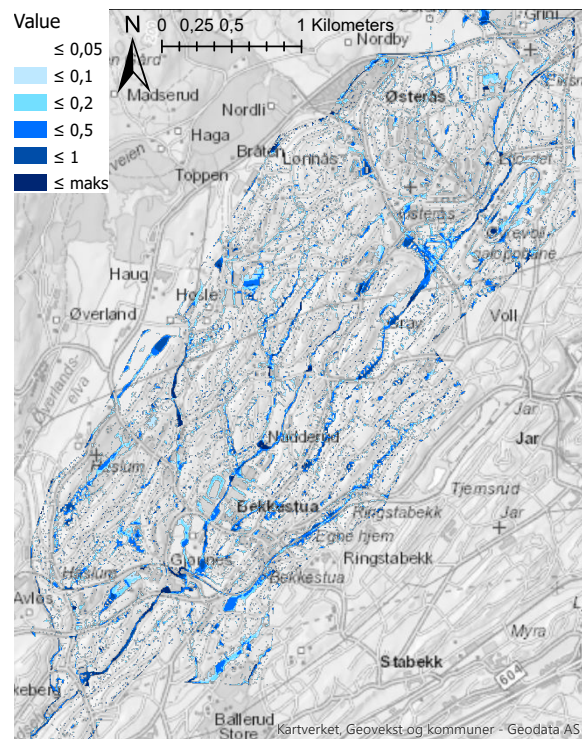
Figur 4.1: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 5 år



Figur 4.2: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 10 år



Figur 4.3: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 50 år

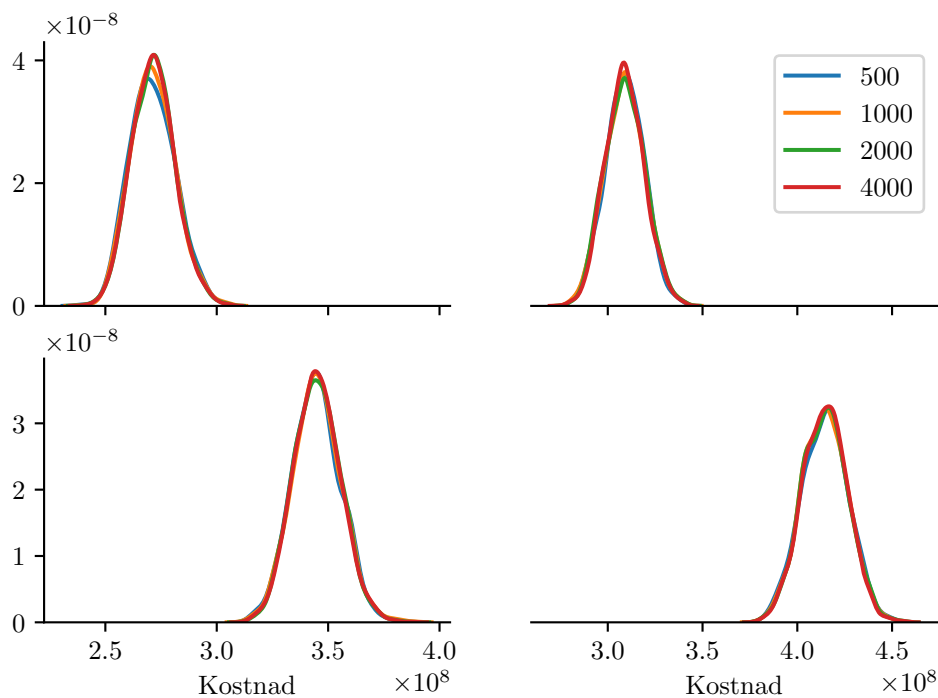


Figur 4.4: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 100 år

4.3 Følsomhetsanalyse

4.3.1 Nødvendig antall iterasjoner i Monte Carlo-analysen

Som nevnt i avsnitt 2.4.5 er det fordelaktig å benytte Monte Carlo-analyse for å representere fordelingen av dataen som følge av usikkerhet i modelleringsparameterne. For å være sikker på at analysen fanger opp bredden på fordelingen burde flere iterasjoner av beregningen utføres, med tilfeldig trekning av parameterne. Problemet er at det er kostbart både tid- og lagringsmessig å utføre ekstremt mange iterasjoner. Derfor er det nyttig å bestemme et så lavt antall iterasjoner som mulig, som fortsatt representerer hele bredden av fordelingen. I figur 4.5 vises kostnadsfordeling ved fire ulike antall iterasjoner, for fire ulike gjentakintervall med så bred tilfeldig trekning av parametere som mulig.



Figur 4.5: Histogrammer over den totale kostnadsfordelingen ved ulike antall iterasjoner. y-aksen representerer sannsynlighetstetthet, slik at arealet under grad = 1. Gjentakintervall på 50, 100, 200 og 1000 år er plottet.

Som det kommer frem i figur 4.5 representerer alle de valgte iterasjonene fordelingen godt, og det holder å benytte for eksempel 1000 iterasjoner i Monte Carlo analysen.

4.3.2 Antall flomutsatte bygninger ved ulike D_{skade}

Antall flomutsatte bygninger er sterkt avhengig av hvilken grense for vanddybden D_{skade} , som settes. For å gi en indikasjon på effekten denne parameteren har, samt for å se hvor mange bygninger som utsettes for flom ved ulike gjentaksintervall er modellen simulert ved ulike parametere og resultatene gjengitt i tabell 4.5.

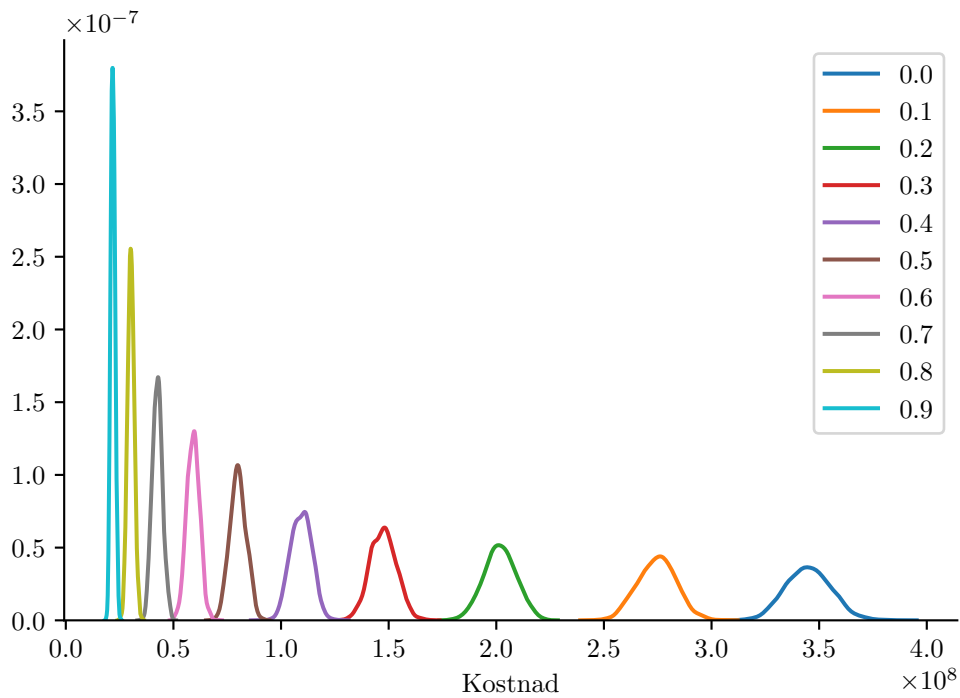
Tabell 4.5: Antall flomutsatte bygninger ved ulike D_{skade} , alle andre restriksjoner for kvantifisering av flomskade fjernet

D_{skade} [m]	Gjentaksintervall								
	5	10	15	20	50	100	200	500	1000
0	12864	12864	12864	12864	12864	12864	12864	12864	12864
0.05	5284	5675	5852	5946	6299	6521	6704	6951	7119
0.1	3636	4078	4273	4405	4735	4962	5165	5395	5542
0.2	1851	2229	2429	2572	2943	3210	3417	3641	3792
0.5	302	451	525	593	803	946	1097	1311	1440

Som vi ser er tilnærmet alle bygningene affisert av flom ved $D_{\text{skade}} = 0$, dette er forventet da alle cellene, som følge av nedbøren, på et eller annet tidspunkt har vann på seg. Årsaken til at det ikke er absolutt alle bygningene skyldes nok at modelleringsområdet til MIKE FLOOD er noe mindre enn området FKB-dataene utspenner. Dette skyldes modelleringsfeil, men ettersom det er en forskjell på bare 11 bygninger ses ikke dette på som et problem.

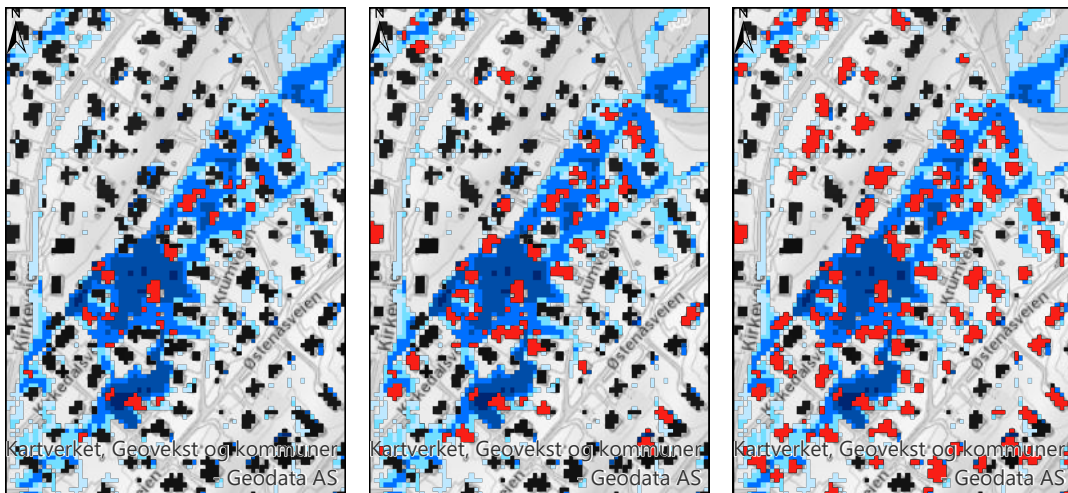
4.3.3 Effekten av andelsparameteren ϕ , ved $D_{\text{skade}} = 0.1$

For å måle effekten ϕ hadde på kostnadene ble den nedre grensen a i fordelingen $[a, b]$ utprøvd mellom 0-0.9 med steg på 0.1. Den øvre grensen b ble holdt fast på 1. Resultatene kan sees i figur 4.6.



Figur 4.6: Histogram over total kostnad av bygninger og biler ved gjentakintervall $T = 200$. Ulike lavere grense a for trekning av ϕ i den uniforme fordelingen $[a, b]$ er vist. Den øvre grensen holdes lik $b = 1$ for alle simuleringene.

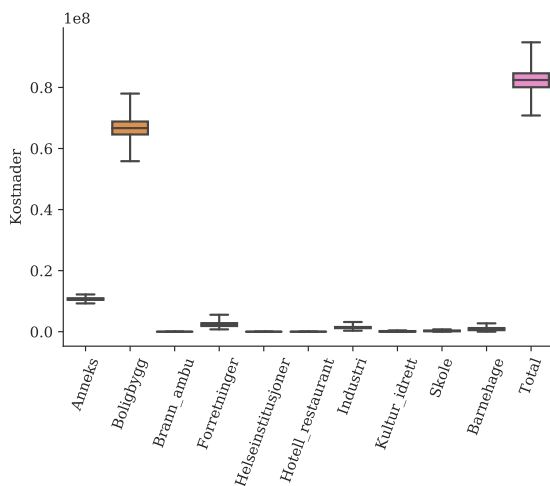
Kost-nyttmodellen har også en metode som skriver flomutsatte objekter tilbake til raster, slik at de kan visualiseres. I figur 4.7 vises eksempler på flomutsatte objekter ved ulike verdier av ϕ .



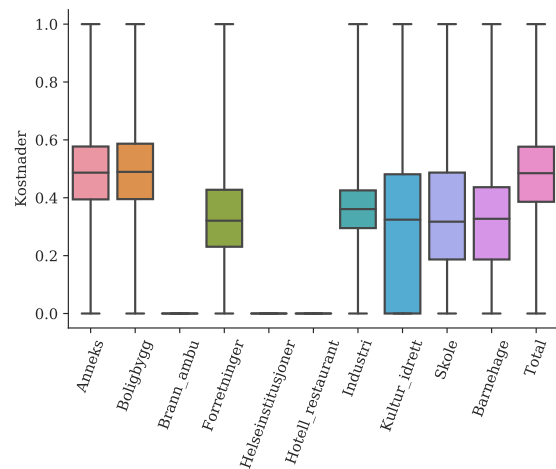
Figur 4.7: Visualisering av bygninger som regnes som flomskadet i rødt, ved gjentakintervall 1000 år. Figur til venstre viser $\phi = [0.6, 1]$, i midten viser $\phi = [0, 1]$ og til høyre viser $\phi = [0, 0]$

4.3.4 Kostnadsfordeling mellom ulike bygningstyper

For å kunne gi en indikasjon på hvordan kostnadene mellom hver bygningstype i kategorien bygninger varier er det plottet boksploott for hver bygningstype. Boksploottene benyttes i oppgaven viser fra ytterst og inn følgende: største/minste observasjon, nedre og øvre kvartil (25 og 75 persentil) samt medianen. I figur 4.8 ser vi at boligbygg er svært dominerende kostnadsmessig sett. For å få en bedre indikasjon på spredningen innad i de ulike kategoriene er kostnadene innad i hver kategori normalisert i figur 4.9. Det kan argumenteres at boksploott ikke nødvendigvis er best benyttet i en situasjon hvor dataen er normalisert, men det gir fortsatt en indikasjon over variasjonen i dataen.



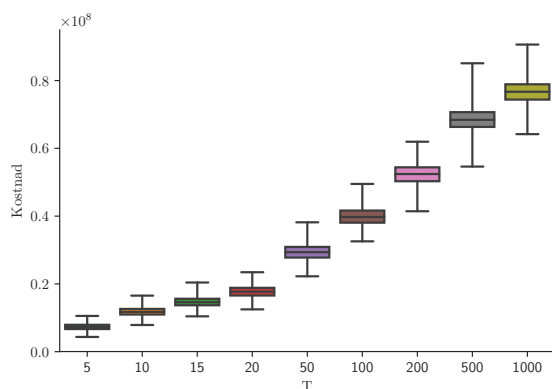
Figur 4.8: Kostnadsfordeling mellom de ulike kategoriene i modellen, ved ϕ trukket fra $[0.6, 1]$, $D_{\text{skade}} = 0.1$ og nedbør med gjentaksintervall 1000 år



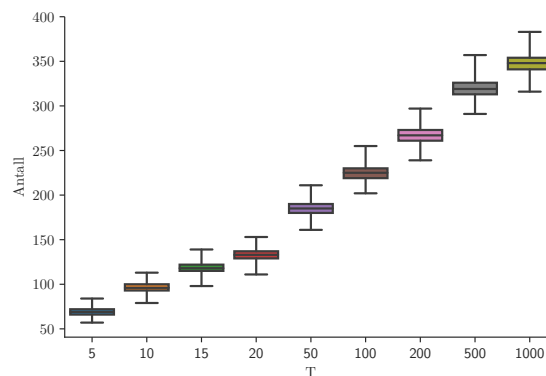
Figur 4.9: Normaliserte kostnader for å bedre vise spredningen innad i kategorien, ved ϕ trukket fra $[0.6, 1]$, $D_{\text{skade}} = 0.1$ og nedbør med gjentaksintervall 1000 år

4.3.5 Kostnadsfordeling mellom ulike gjentaksintervall

For å kunne gi en indikasjon på variasjonen i kostnader og antall skader for hvert gjentaksintervall er det i figur 4.10 og 4.11 plottet boksploott over henholdsvis kostnad og antall skade.



Figur 4.10: Kostnadsfordelingen ved ulike gjentaksintervall



Figur 4.11: Fordeling og variasjon av antall skader ved ulike gjentaksintervall

4.4 Kost-nytte: regnet sjette august

Som nevnt i innledningen på kapittelet legges det fokus på skade på bygninger ettersom dette er den skadedataen som er tilgjengelig gjennom vannskadestatistikken til Finans Norge på nåværende tidspunkt. Dersom det på et senere tidspunkt kommer mer detaljerte skadedata over kostnader knyttet til objekter utover bygninger, kan en utvidet analyse som også inkorporer flere objekter (som biler, veger og lignende) utføres.

4.4.1 Valg av modellparametere og beregningsmetode

For å kunne benytte kost-nyttmodellen må den kalibreres opp mot reelle skadedata. I denne oppgaven benyttes skadedata som gjelder for hele Bærum, per år, men også skadedata fra enkelthendelsen sjette august 2016 (tabell 4.3). Etersom modelleringsområdet i denne oppgaven kun omhandler ett mindre område i Bærum kommune må skadedataen fra hele Bærum kommune nedskaleres for å finne representative tall for modelleringsområdet. For å finne hvor mye skadene må nedskaleres antas det at skadene er direkte korrelert med antall bygninger. Etersom det i Bærum kommune er 50871 bygninger som er klassifisert som boliger, mens det i modelleringsrområdet er 7601 boliger (tabell 4.1), kan det antas at kostnadene i modelleringsområdet må nedskaleres med en faktor på $7601/50871 \approx 0.15$.

Dataene skalert med 0.15 gir følgende antatte kostnader for modelleringsområdet (egenandel på 4500kr per skade inkludert).

Tabell 4.7: Estimerte skadedata knyttet til ”vanninntregning utenfra” over modelleringsområdet fra de siste 10 år (2008-2018). Kostnadene er gitt i nominelle kroner, og inkluderer egenandel (4500kr per skade). Skadene fra hendelsen sjetten august 2016 er fremhevet

År	Totalt		Hvorav 060816	
	Antall	Kostnad i 1000kr	Antall	Kostnad i 1000kr
2008	38	1413		
2009	25	908		
2010	33	1047		
2011	50	2243		
2012	28	840		
2013	39	1281		
2014	44	1249		
2015	51	1913		
2016	235	34879	131	28088
2017	63	2588		
2018	58	2028		

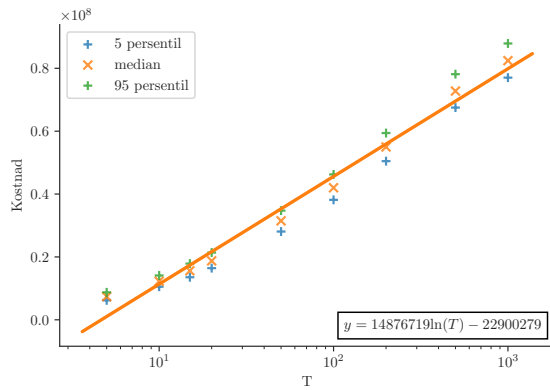
For å kalibrere kost-nyttmodellen er det tatt utgangspunkt i hendelsen sjetten august 2016, både ved å se på kostnaden, men også ved å se på antall skader. For å tilpasse modellen er andelsparameteren ϕ justert, mens D_{skade} er satt til 0.1. Kostnad- og sårbarhetsparameterene er ikke endret.

For å kunne benytte kost-nyttmodellen på hendelsen sjetten august 2016 var det også nødvendig å ha flomresultater fra flommodellen, kjørt med regnet sjetten august. Disse resultatene fremkom fra Swecos opprinnelige prosjekt, som benyttet samme modell som er brukt i denne oppgaven. Som påpekt tidligere ble derimot infiltrasjonsparameterne, samt overførselsparameterne mellom kum og overflate justert da modellen ble brukt i denne oppgaven, så resultatene fra det opprinnelige prosjektet antas å være noe større ettersom det ble modellert med mindre infiltrasjon.

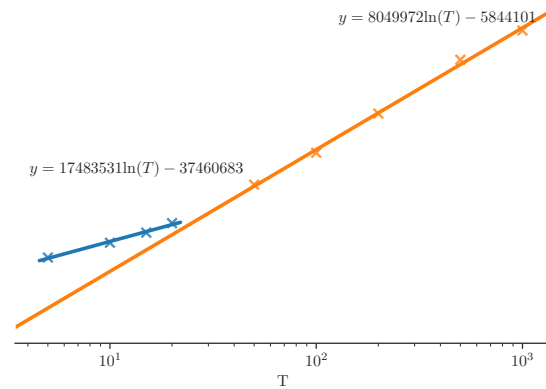
Det ble funnet at ved $\phi = [0.6, 1]$ og $D_{\text{skade}} = 0.1$ så stemte kost-nyttmodellen meget godt for hendelsen sjetten august. Kostnaden ble i modellen estimert til å være 28988715 kr, med 134 tilfeller av bygningsskade. Sammenlignet med 28088000kr og 131 skader (fra tabell 4.7) er dette tilfredsstillende nok til at $\phi = [0.6, 1]$ og $D_{\text{skade}} = 0.1$ kan benyttes videre i analysen.

4.4.2 Definerings av skadefunksjonen $DF(T)$

Med modellparameterene fra forrige avsnitt kan kostnadsrelasjonen mellom skade og gjentakintervall defineres ved kost-nyttmodellen.

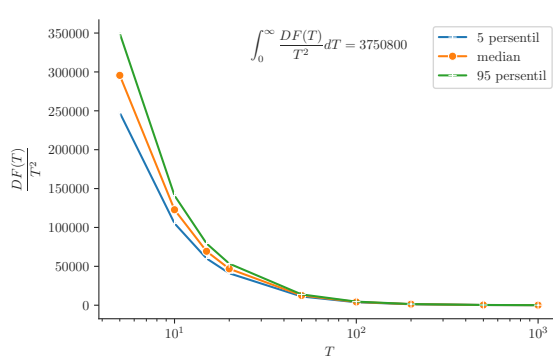


Figur 4.12: Kostnader ved de modellerte gjentakintervallene, inkludert 5. og 95 persentiler.

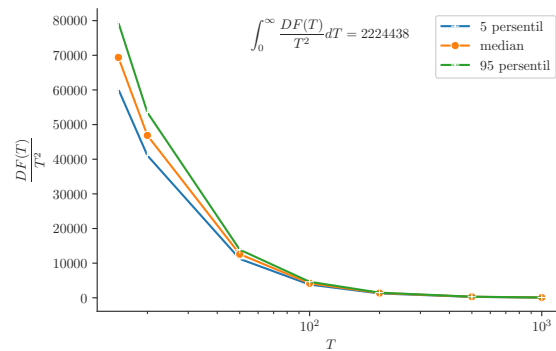


Figur 4.13: Regresjonsligner for å ta hensyn til knekkpunktet rundt $T=20$

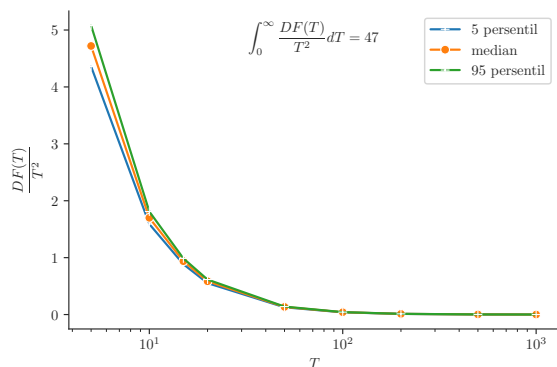
4.4.3 Forventet årlig skade



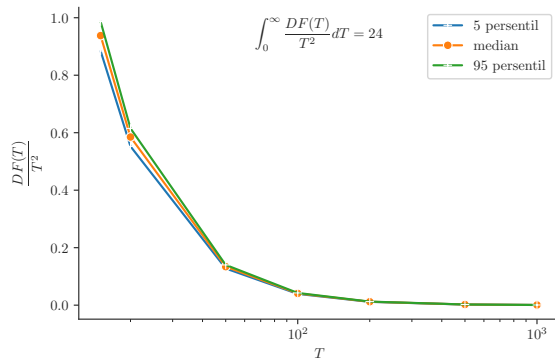
Figur 4.14: Forventede årlige kostnader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, integralet på toppen betegner den forventede årlige kostnaden ut i fra mediankostnaden.



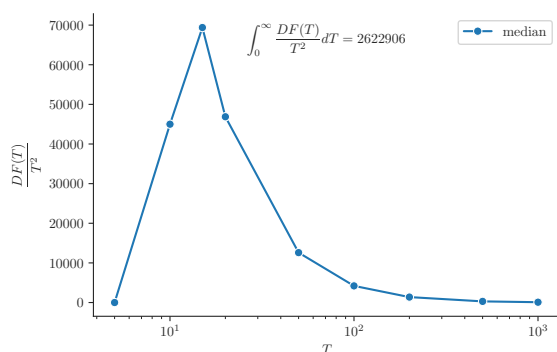
Figur 4.15: Forventede årlige kostnader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, utenom 5 og 10-års gjentakintervall. Integralet på toppen betegner den forventede årlige kostnaden ut i fra mediankostnaden



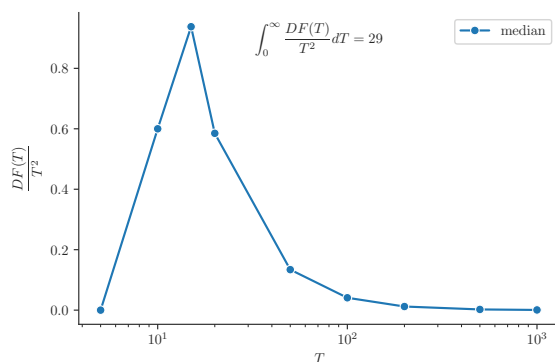
Figur 4.16: Forventede årlige skader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn. Integralet på toppen betegner det forventede årlige skadeantallet ut i fra medianskadene.



Figur 4.17: Forventede årlige skader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, utenom 5 og 10-års gjentaksintervall. Integralet på toppen betegner det forventede årlige skadeantallet ut i fra medianskadene



Figur 4.18: Forventede årlige kostnader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, hvor 5 og 10-årsregn er manuelt lagt inn etter skjønn. Integralet på toppen betegner den forventede årlige kostnaden ut i fra medianskaden



Figur 4.19: Forventede årlige skader ved $\phi = [0.6, 1]$ For alle modellerte regn, hvor 5 og 10-årsregn er manuelt lagt inn etter skjønn. Integralet på toppen betegner det forventede årlige skadeantallet ut i fra medianskaden

4.4.4 Fremtidig skade og eksempel på nytteberegning

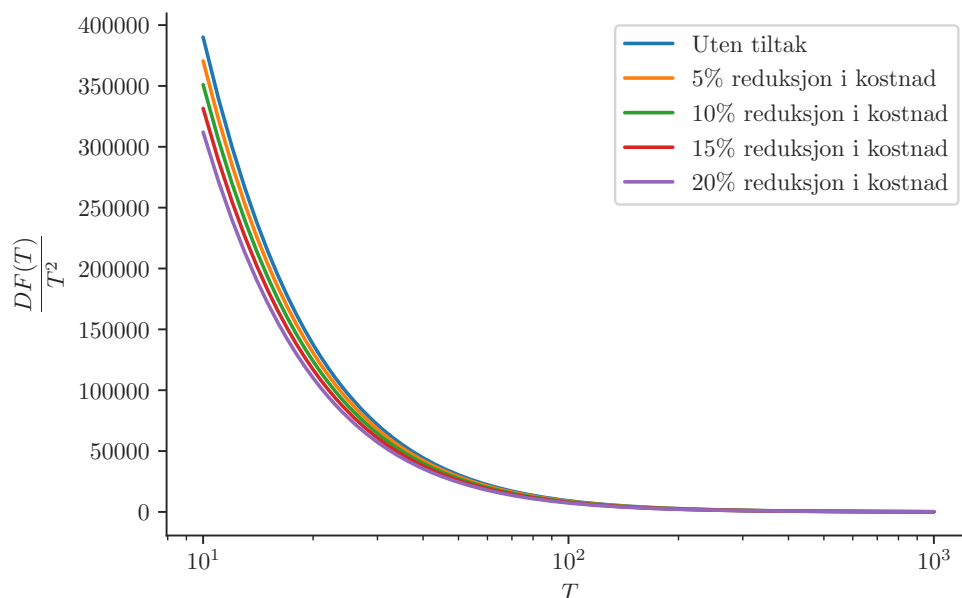
For å gi et eksempel på hvordan kost-nyttmodellen kan benyttes til å beregne nytten av et tiltak har en statistisk prosentvis andel blitt trukket fra kostnadene som ble funnet ut i fra flomresultatene. Deretter ble de nye, reduserte, kostnadene sammenlignet opp mot den originale kostnaden ved formelverket presentert i avsnitt 2.4. På denne måten antas det at de nye, reduserte kostnadene representerer reduksjon i kostnad som følge av hypotetiske tiltak utført i modelleringsrområdet.

Nåverdien ved de ulike reduksjonene av kostnad viser i dette tilfellet hvor stor den største investeringskostnaden kan være per i dag som fortsatt gir samfunnsøkonomisk nytte. Med andre ord vil nåverdien være 0 dersom den eksakte summen som presenteres i tabell 4.9 benyttes til mottiltak. Det må påpekes at disse verdiene kun er ment som et eksempel, og kan ikke benyttes til virkelige tiltak, ettersom det krever en fullstendig utredning av alle kostnadene, og ikke kun kostnader knyttet til bygninger. I dette eksempelet ble det antatt at tiltakene ville ha en levetid på $N = 81$ år (frem til år 2100) med klimafaktor $KF = 1,4$ i år 2100. Interpolasjonskonstantene ble funnet fra ligning 2.8 ved figur 4.12 og fra nedbørstall fra IVF-kurver. Interpolasjonskonstantene benyttet var som følger $a = 13895876.462474128$, $b = -21104929.125676427$, $c = 0.0338077233$, $d = 0.1385526536$, $f = 7.2173287294$ og $g = 24.4470774824$.

Tabell 4.9: Eksempler på nåverdi ved ulik reduksjon i kostnader

	Kostnadsreduksjon			
	-5%	-10%	-15%	-20%
NNV	5.160.738	10.321.474	15.482.210	20.642.946

I figur 4.20 vises de ny-genererte kostnadskurvene, med ulik grad av reduksjon i kostnad, funnet ved ligning (3.5).



Figur 4.20: Forventede årlige kostnader med utgangspunkt i ligning (3.5), hvor en statistisk prosentvis andel har blitt trukket fra den originale kostnadsfunksjonen (definert ved $\phi = [0.6, 1]$ og $D_{\text{skade}} = 0.1$) for å definere ligning (3.5) for flere scenarier.

5. Diskusjon

Dette kapittelet vil referere til resultatene fra kapittel 4. Hovedfokuset vil ligge på resultatene rundt og fra kost-nyttmodellen. Selv om målsetningen i denne oppgaven ikke var å studere nøyaktigheten til flommodeller vil usikkerheten til flommodellen benyttet i denne oppgaven diskuteres. Dette er fordi usikkerhetene fra flommodellen vil, som nevnt, overføres til resultatene fra kost-nyttmodellen. Derfor er det viktig å forstå usikkerhetene i flommodellen, og hvordan de oppfører seg ved ulike gjentaksintervall, slik at påvirkningen deres kan tolkes i resultatene fra kost-nyttmodellen.

5.1 Flommodellen

Som forklart i avsnitt 3.3 var flommodellen brukt i denne oppgaven den første flommodellen Sweco utviklet for Bærum kommune tilbake i 2017. Derfor var det klart allerede på forhånd at modellen ikke var presis for alle områder som tidligere hadde opplevd flomproblematikk knyttet til nedbør innenfor modelleringsområdet. Ideelt sett burde derfor en modell som var ytterlige kalibrert blitt benyttet i dette prosjektet, noe som også var planen, men grunnet uforutsette hendelser lot ikke dette seg gjøre. Flommodellen gir allikevel flomresultater som kan brukes til å undersøke hvordan kost-nyttmodellen oppfører seg, men resultatene fra kost-nyttmodellen må i tillegg til sin egen usikkerhet også spesielt evalueres opp mot usikkerhetene fra flommodellen.

En av de mest åpenbare usikkerhetene ved flommodellen kommer frem ved modellering av nedbør med lave gjentaksintervall. I Norge er det vanlig dimensjoneringspraksis å dimensjonere overvannsledninger med hensyn på nedbør med 10-års gjentaksintervall, med andre ord ville det vært naturlig å tenke at flommodelleringen ville vise lite overflatevann for nedbør med gjentaksintervall 10 år eller mindre. Fra figur 4.1 og 4.2 kommer det dog tydelig frem at det forekommer mye vann på overflaten ved 5 og 10-års gjentaksintervall. Dette skyldes svakhet i flommodelleringen ved lavere gjentaksintervall/mindre vann. Akkurat hva som gjør det er ikke helt åpenbart, men det er et kjent problem.

MIKE FLOOD benytter som vist i avsnitt 2.3 en kjent metodikk for beregning mellom

1D ledningsnett og 2D overflate. Det som er mer overraskende er at MIKE FLOOD benytter en egenutviklet infiltrasjonsmodell, i stedet for å bruke anerkjente modeller som Richards ligning, Green-Ampt eller Horton - selv om DHI leverer andre programmer (MIKE SHE for grunnvannstrømning) som benytter disse modellene. Flommodelleringsresultatene viser at infiltrasjonsmengden konvergerer rundt 400000 m^3 . Dette tilsier rundt 25 mm vann infiltrert over hele modelleringsområdet (16 m^2) over regnvarigheten på seks timer. Det kan være vanskelig å si hvorvidt dette er fornuftige tall, ettersom variasjonen i infiltrasjonskapasitet kan være ekstremt stor ved ulike jordtyper, men det synes å være noe lavt med bare 25 mm.

I tillegg til infiltrasjon vil usikkerheten knyttet til måten overvannet føres mellom overflaten og ledningsnettet på, samt usikkerheten knyttet til at nedbøren belastes med lik intensitet over modelleringsområdet potensielt føre til at modellen opplever for mye vann generelt sett.

5.2 Følsomhetsanalyse

5.2.1 Antall iterasjoner og trekningen av parametere

For å modellere usikkerheten i kost-nyttmodellen ble det som kjent utført en Monte Carlo analyse. Fra figur 4.5 kom det frem at kostnadsfordelingen ble godt representert allerede ved 500 iterasjoner. I utgangspunktet var det forventet at det var nødvendig med et langt høyere antall iterasjoner. Årsaken til at kostnadsfordelingene i figur 4.5 ikke varierer mer, og dermed ikke trenger like mange iterasjoner, skyldes antageligvis at det ikke trekkes nye sårbarhetsverdier og ny ϕ for hver simulering, men for hvert objekt i hver simulering. Dette fører til at kostnadsfordelingen konsentreres i større grad, ettersom sannsynligheten for at alle objektene trekker verdier som tilsier høy eller lav kostnad blir forsvinnende liten. Det antas at dette er den mest fornuftige måten å trekke sårbarhetsverdier og ϕ , ettersom objekter (i dette tilfellet bygninger) ikke er like når det gjelder byggekost, innbo eller hvorvidt huset har elementer, slik som høy grunnmur, som gir beskyttelse mot flomvann.

5.2.2 Kalibreringsparameterne D_{skade} og ϕ

Det kommer tydelig frem fra resultatene at både D_{skade} og ϕ kan ha stor innflytelse på kvantifiseringen av flomutsatte bygninger. Fra tabell 4.5 ses effekten av D_{skade} spesielt godt mellom $D_{\text{skade}} = 0$ og $D_{\text{skade}} = 0.05$, hvor bygningsmassen truffet av flomvann hal-

veres. Som forventet har dermed D_{skade} ekstremt mye å si for hvor mange bygninger som kvantifiseres som flomutsatt, samtidig viser resultatene at det hovedsaklig er fornuftig å benytte D_{skade} som en metode for ekskludere celler med svært lite vann på seg, ettersom D_{skade} ikke kan si noe om hva som faktisk skjer mellom flomvann og et objekt. Av den grunn ble det valgt å benytte $D_{\text{skade}} = 0.1$ til resten av analysene. Da ekskluderes alle celler med mindre enn 10 cm vann.

For å kunne si noe om interaksjonen mellom flomvann rundt en bygning ble andelsparameteren ϕ benyttet. I figur 4.6 vises effekten av parameteren ved å variere den nedre grensen i den uniforme trekningen. Ettersom ϕ relaterer andelen av omrisset til en bygning som er truffet av vann betyr det effektivt sett at en større andel av bygningen kreves å være truffet av flomvann for å kunne kvantifiseres som flomskadet. Det kommer også tydelig frem av figur 4.6 at justering av ϕ kan gi nesten hvilken kostnad som helst, det er derfor viktig å være klar over betydningen grensene for trekningen av ϕ har. Eksempelvis betyr en øvre grense på 1 i trekningen at et objekt som er fullstendig omkranset av vann ikke nødvendigvis (ϕ trekkes til 1) blir kvantifisert som flomutsatt. Samtidig vil en nedre grense på 0 føre til at bygninger blir kvantifisert som flomutsatt, med bare en celle med vann på omrisset.

Fremgangsmåten med ϕ har et par tydelige svakheter. Først og fremst at det skal veldig mye til at store bygninger kvantifiseres som flomutsatte, ettersom omrisset av bygningene blir meget stort. Da kan en situasjon hvor deler av en stor bygning egentlig er utsatt for vann føre til at bygningen ikke kvantifiseres som flomutsatt ettersom den vannutsatte delen utgjør en liten andel av det totale omrisset. En måte å motvirke dette på kan være å dele opp store bygninger, med unike FID-koder, slik at det kan antas at en del av bygningen blir oversvømt, men ikke nødvendigvis hele. Den andre svakheten med tilnærmingen er at sårbarheten til bygningen trekkes med hensyn på den enkelt cella med dypest vann. Dette kan være problematisk dersom en av cellene rundt huset har mye mer vann som følge av en feil i terrengmodellen eller lignende. En bedre antagelse ville vært å benytte gjennomsnitt, eller median-dybden av cellene rundt bygningen til å velge sårbarhetsverdi.

Det ble antatt i valget av ϕ i oppgaven at det vil kunne forekomme tilfeller hvor det er legitimt å si at en bygning er fullstendig dekket av flomvann uten at det gir skade, eksempelvis bygninger uten kjeller med høy grunnmur. Motivasjonen for å innføre ϕ var for å unngå at bygninger med svært få celler truffet av vann ble kvantifisert som flomskadet, da dette gjerne skyldtes problemer med terrengmodellen. Av den grunn var det naturlig å ikke sette den nedre grensen av ϕ til 0. Samtidig ville det ikke være utenkelig at enkelte bygninger blir flomskadet selv med en mindre andel av omrisset truffet av vann, derfor burde det hypotetisk sett være fornuftig med en nedre grense

som heller ikke var for høy. Ved kalibrering av modellen ble det derimot funnet at kostnadene ved bygningsskade ble best representert ved en nedre grense på 0.6 (eller 60% av omrisset dekket med vann). Sammenlignes dette med de ulike ϕ simulert i figur 4.7 kan det, visuelt sett, tyde på at en nedre grense på 0.6 underestimerer antall skadde bygninger. Et annet, uforutsett bruksområde til ϕ kan være å motvirke usikkerhet fra flommodellen, eksempelvis dersom flommodellen overestimerer vannmengdene kan den nedre grensen til ϕ settes høyere slik at mer vann skal til for å kvantifisere en bygning som flomskadet, og visa versa. Uten å ha data over akkurat hvilke bygninger som tidligere har opplevd skade vil det være tilnærmet umulig å si hvilken av situasjonene i figur 4.7 som er, fysisk sett mest riktig.

Spørsmålet rundt hvorvidt resultatene fra kost-nytte modellen trenger å være fysisk korrekt, i den forstand at modellen klarer å peke ut akkurat de samme husene som tidligere har opplevd flomskade er interessant. Det er ikke uvanlig at statistiske modeller ikke klarer å gjengi nøyaktig hva som har skjedd i én spesifikk situasjon, så lenge modellen klarer å predikere den overordnede trenden (eksempelvis flomskade for et helt område, kontra enkelte bygning). Det kan argumenteres for at dette vil være en god tilnærming i kost-nytte sammenheng, ettersom mangel på detaljert data over flomskader ofte er et problem. Dersom det velges å rendyrke en slik tilnærming er det dog nødvendig å kalibrere modellen mot flere hendelser enn det som er gjort i denne oppgaven.

5.2.3 Kostnadsfordelinger

For å se hvordan kostnadene til de ulike objektene i kost-nyttmodellen oppfører seg viser figur 4.8 og 4.9 den interne spredningen av kostnader. I figur 4.8 kommer det tydelig fram at boligbygg er kategorien som definitivt bidrar mest til den totale kostnaden i modelleringsområdet. Dette er i og for seg forventet da modelleringsområdet hovedsaklig er kategorisert av boligbebyggelse. For å få et bedre inntrykk av spredningen til de andre kostnadskategoriene er kostnadene normalisert i figur 4.9. Ideelt skulle, ved en perfekt fordeling, median-streken på boksplottet sammenfalle med 0.5 på y-aksen, ettersom medianen representerer midtpunktet i fordeling. Dette er tilnærmet tilfellet for enkelte av kategoriene (Anneks, Boligbygg). For de andre kategoriene er det langt større spredning, både i hvor medianen ender relativt til y-aksen, men også over nedre og øvre kvartil. Spredningen skyldes i hovedsak at det er langt færre av de andre kategoriene (se tabell 4.1). Dette fører til at det både er mindre sannsynlig at bygningene treffes av flomvann, og når de først treffes av flomvann er det som regel de samme bygningene som påvirkes, men i enkelte tilfeller vil en spesiell trekning av ϕ kanskje føre til at en ny bygning innenfor kategorien kvantifiseres som flomskadet, noe som drastisk forandrer totalkostnaden innenfor kategorien. Det er hovedårsaken til at medianen til

de kategoriene med få tilfeller av skader havner under 0.5.

I figur 4.10 og 4.11 gjengis spredningen i kostnader og antall skader for hvert simulerte gjentakintervall. Det er en antydning til at spredningen mellom største og minste observasjon øker relativt sett med økende gjentakintervall, men kvartilene holder seg rimelig stabile.

5.3 Kost-nytte: regnet sjette august

Selv om det ikke var mulig å innhente detaljerte tall på kostnadene knyttet til flomskader innenfor modelleringsområdet ble dataen for hele Bærum kommune benyttet til å gi et estimat på kostnadene innenfor modelleringsområdet. Det antas å være en grei antagelse å skalere med hensyn på antall boliger, ettersom kostnadene innenfor modelleringsområdet omhandler, i all hovedsak, boligbygg (figur 4.8).

5.3.1 Skadefunksjon og forventet årlig skade

Ved å kalibrere modellen mot hendelsen sjette august, med de nedskalerte skadene i tabell 4.7 ble det funnet at ved $\phi = [0.6, 1]$ og $D_{\text{skade}} = 0.1$ så var det god overensstemmelse mellom kostnadene til det modellerte regnet sjette august og kostnadsdataene fra Finans Norge. Dette resultatet i seg selv er ganske verdiløst da modellen lar seg justere såpass mye at nærmest hvilken kostnad som helst kunne blitt definert dersom ønsket. Det som er interessant med resultatene er hvordan kost-nyttmodellen som er kalibrert mot sjette august holder seg ved å bruke samme parametere til å beregne fremtidige årlige kostnader og skader. Deretter kan de beregnede forventede årlige kostnadene og skadene sammenlignes med tidligere års kostnader og skader fra tabell 4.7.

Et interessant moment ved defineringen av skadefunksjonene $DF(T)$ (vist i figur 4.12 og 4.13) er forskjellen mellom 5, 10, 15 og 20-års gjentakintervall og de resterende gjentakintervallene. Dette ”knekkpunktet” er vist tydeligere i 4.13 og kan tyde på at flommodellen fortsatt fanger opp betydningen av dimensjoneringskriteriet på 10 års gjentakintervall for overvannsledningene.

Med videre beregninger med $\phi = [0.6, 1]$ og D_{skade} ble det funnet som vist i figur 4.14-4.19 at beregning av forventet årlig skade ikke utviklet seg som forventet fra teorien (avsnitt 2.4.3). Olsen mfl. (2015) fant at kurven med forventede årlige kostnader steg fra origo opp til et toppunkt ved 20-30 års gjentakintervall, før kurven sank i likhet med resultatene funnet i figur 4.14-4.19. Resultatet av at $\frac{DF(T)}{T^2}$ ikke oppnår et toppunkt rundt 20-30 år, men heller fortsette å øke desto nærmere null, fører i denne modellen

til en overestimering av de forventede årlige kostnadene, ettersom det regnes arealet under grafen til $\frac{DF(T)}{T^2}$. Problemet skyldes at $\frac{DF(T)}{T^2}$ fortsatte å vokse for små gjentakintervall (hovedsaklig 5 og 10 år, men også muligens 15 og 20 år). Årsaken til dette er delvis diskutert i 5.1, og handler om at kostnadene knyttet til nedbør med 5 og 10-års gjentakintervall er langt høyere enn hva som kan forventes ut fra dagens dimensjoneringspraksis. Det ble også gjort klart i avsnitt 5.1 at dette i stor grad skyldes unøyaktigheter i beregningsmetodikken til flommodellen.

For å prøve og gjøre bukt med unøyaktighetene knyttet til 5 og 10-års gjentakintervall ble to ulike beregninger utført. Først en konservativ variant, hvor 5- og 10-års gjentakintervall ble fjernet (figur 4.15 og 4.17), deretter et forsøk på å estimere verdier for 5 og 10 års gjentakintervall (figur 4.18 og 4.19). Den konservative varianten ga en årlig forventet kostnad på 2,22 millioner og et forventet antall skader på 24, mens den sistnevnte varianten ga en årlig forventet kostnad på 2,26 millioner med et forventet antall skader på 29. Sammenlignes denne skademengden med tallene fra tabell 4.7, hvor skadeantallet varierer mellom 25-58 og kostnadene mellom 0,840-2,588 millioner (ekskludert hendelsen sjette august) så klarer kost-nyttmodellen, med parameterne $\phi = [0.6, 1]$ og $D_{\text{skade}} = 0.1$, å finne relativt gode tall på årlig forventede kostnader og skader ved å kalibrere modellen mot en enkelt hendelse (sjette august). Det er viktig å påpeke at det foreligger vesentlige usikkerheter knyttet til resultatene fra kost-nyttmodellen, spesielt beregningen av årlig forventet skade, som er strekt avhengig av skaden som beregnes ved lave gjentakintervall. Skadefunksjonen klarer antageligvis å demme opp deler av usikkerheten fra flommodellen ved å kalibrere kostnadene opp mot dataen fra Finans Norge ved ϕ .

5.3.2 Eksempel på nytteberegning

Ettersom nytteberegningen er halve poenget i en kost-nyttmodell var det viktig å gi et eksempel på hvordan nytteberegningen kunne foregått. Ettersom kun bygninger ble evaluert i denne modellen vil resultatene av nytteberegningen kun reflektere sparte kostnader knyttet til bygninger ved et tiltak. For at resultatene fra nytteberegningen skulle kunne bli brukt til å angi en korrekt nytte ved et tiltak burde alle kostnader knyttet til flomhendelsen vært med i modellen.

I denne oppgaven ble det ikke utført tiltak i flommodellen, det kunne derfor ikke utføres en nåverdianalyse som inkluderte investeringskostnaden til tiltaket. Derfor ble heller nåverdien funnet ut i fra en potensiell reduksjon i skade. Eksempelvis ble det funnet at ved å redusere kostnadene med 20% kunne 20,6 millioner bli brukt i dag på tiltak med levetid frem til år 2100. Dette betyr ikke at hvis en bruker 20,6 millioner på tiltak så

oppleves en reduksjon på 20%, men at ved modellering av tiltak som gir 20% reduksjon vil en ha mulighet til å bruke 20,6 millioner på slike tiltak. Ettersom denne analysen kun så på bygninger ville en reduksjon på 20 % reelt sett med alle andre kostnader inkludert ha en høyere nytte enn 20,6 millioner.

Beregninger av denne typen kan brukes av beslutningstagere på flere måter. Det kan eksempelvis utføres analyser på delområder av et nedbørsfelt for å finne hvilke steder som har størst nytteverdi ved reduksjon av flomutbredelse som følge av tiltak. Videre kan også vanlige analyser med vanlige flomreduserende tiltak utføres, slik som flomveier og lignende. Ettersom modellen utfører beregningen tilnærmet automatisk vil det være mulig å modellere mange flere tiltak enn det som ellers ville vært mulig, noe som gir et bredere og bedre beslutningsgrunnlag.

Nytteberegningen utført i oppgaven er av det enkle slaget, da investeringkostnaden ikke ble inkludert. Det er mulig å utføre ytterligere beregninger hvor også investeringskostnaden diskonteres og avskrives over levetiden til et tiltak, men dette krever økonomisk analyse som ligger utenfor denne oppgavens målsetning.

5.4 Generelle betraktninger

5.4.1 Manglende kostnadsdata

En av de største svakhetene ved modellen slik den er presentert i denne oppgaven er manglende utregning av flere kostnadstyper. Dette gjelder både materielle og immaterielle kostnader. Modellen kan i utgangspunktet regne på bilkostnad og vegkostnad, men ettersom det manglet god data på hvordan disse skadene var ved flomhendelser ble de sløffet i resultatdelen. Det antas at kostnader knyttet til skade på materielle goder utover bygning, samt immaterielle kostnader kan ha stor betydning på den endelige kostnaden (Magnussen mfl., 2015). Det må tas litt selvkritikk til mangel på mer detaljert kostnadsdata i denne oppgaven, men arbeidet med å konstruere modellen ble mer omfattende enn først antatt. Heldigvis er det lagt opp til at nye kostnadsmodeller relativt enkelt kan legges til i kost-nyttmodellen, ettersom det foreligger gode tall på kvantifiseringen av flomutsatte bygninger og annen infrastruktur som veg og t-bane. Eksempelvis er det mulig å kunne utvikle en modell som knytter en kostnad opp mot tidstap som følge av oversvømte veier

5.4.2 Log-lineær sammenheng mellom skade og gjentaksintervall

Antagelsen om log-lineær sammenheng mellom skade og gjentaksintervall er en antagelse som er benyttet i andre kost-nytte analyser (Hoven mfl., 2018; Sælthun, 2018; Olsen mfl., 2015) i tillegg til at det er en vanlig antagelse å bruke innenfor hydrologiske analyser (Olsen mfl., 2015). I denne oppgaven ble, som tidligere nevnt, nedbørhendelsen sjetten august 2016 også analysert. Dette regnet slo ut med gjentaksintervall over 200 år for ulike regnvarigheter ved ulike lokasjoner rundt om i Asker og Bærum (Bærumkommune, 2017). Ut i fra dette skulle en tro at kostnaden og flomutbredelsen for det modellerte regnet sjetten august skulle sammenfalle med det modellerte 200-årsregnet som ble konstruert i denne oppgaven, men som presentert i teorien er ikke dette alltid tilfellet. Rent visuelt kan en se ut fra figur C.7 og C.10 i appendiks C at dette ikke stemmer. Flomutbredelsen fra nedbørhendelsen sjetten august ser ut til å stemme bedre overens med et 50-årsregn enn ett 200-årsregn. Dette bekreftes også ut i fra skadekostnaden hvor kostnyttmodellen gir en kostnad på rundt 28 millioner kroner, mens det modellerte 50-års regnet gir en kostnad på rundt 32 millioner kroner. Til sammenligning gir 200-års regn en kostnad på rundt 55 millioner.

Så da er spørsmålet, hvorfor er det sånn? Etersom det ved modellering av ekstreme hydrologiske hendelser, slik som ekstremnedbør eller elveflom, benyttes ekstremverdifordelinger (avsnitt 2.1.1) viser det seg at disse fordelingene gir log-lineær sammenheng mellom gjentaksintervall og mengde (eksempelvis antall mm nedbør, eller volumstrøm). Deretter antas det at skaden også øker på samme måte. Dette vil være fornuftig dersom det alltid forventes en lik mengdeverdi ved et gitt gjentaksintervall, eksempelvis ved elveflom, hvor gjentaksintervallet er styrt av volumstrømmen. Ved skade som følge av nedbørhendelser er derimot bildet annerledes. Først og fremst ved at nedbør kommer i ulike intensiteter (regnvarigheter) for ulike gjentaksintervall. Dette tas i utgangspunktet hånd om ved å innføre symmetriske regnhyetogram som inkorporerer toppintensitetene for alle regnvarigheter ved et gitt gjentaksintervall. Problemet er at reelle nedbørhendelser ikke nødvendigvis sammenfaller med en slik antagelse, noe som hendelsen sjetten august 2016 er et eksempel på. Videre er den initielle tilstanden til området hvor nedbøren kommer svært viktig for hvordan skadene utvikler seg. Eksempelvis kan infiltrasjonskapasiteten variere mye ut i fra hva som har skjedd med tanke på nedbør i forkant av den ekstreme nedbørhendelsen, lite regn i forkant vil gi tørrere grunn og høyere infiltrasjonskapasitet og visa versa. Tidspunktet på året kan også være relevant, ettersom overflateruheten og intersepsjonskapasitet kan endres mellom eksempelvis sommer og høst, noe som kan utgjøre forskjell på skadesituasjonen. Derfor er det klart at skadesituasjonen er avhengig av mer enn bare gjentaksintervall for nedbørhendelser, og at det er en antagelse som

må benyttes med omhu.

I denne oppgaven benyttes antagesen om log-lineær sammenheng mellom gjentaksintervall og kostnad. Selv om kostnaden er avhengig av mer enn bare gjentaksintervall er ikke resultatene ubrukelige, ettersom gjentaksintervall og regnmengde fortsatt i stor grad er styrende og regnene benyttet i oppgaven er i tillegg av en karakter som inkorporerer variasjon i intensitet. Allikevel bør resultatene tolkes i syn av hvilken de andre parameterne påvirker flomstørrelsen.

En bedre modell for skadefunksjonen ville muligens vært en modell $DF(S)$ hvor S betegner størrelsen, eller utbredelsen til flommen. Denne størrelsen kunne eksempelvis tatt mer hensyn til de ulike paramterne som flomstørrelsen er avhengig av. En annen måte kunne vært å analysere beste og dårligste utfall ved å justere parameterne deretter. På den måten kunne et intervall av muligheter defineres.

6. Konklusjon

I denne oppgaven har den nødvendige teorien rundt, og resultatene fra en kost-nyttmodell kombinert med flommodell blitt presentert. Kost-nyttmodellen er konstruert i Python, med bruk av flomresultater fra MIKE FLOOD. For å kalibrere kost-nyttmodellen ble kostnadsdata over Bærum kommune, levert av Finans Norge, benyttet. Dessverre inneholdt dataen kun kostnadsdata relatert til bygninger. Derfor ble kun bygninger inkludert i resultatene fra kost-nyttmodellen, selv om modellen også kan kvantifisere veier og biler som treffes av vann.

Resultatene indikerer at kost-nyttmodellen klarer å kvantifisere flomutsatte bygninger med bruk av FKB-data på en tilfredsstillende måte. Det var ikke mulig å sjekke hvorvidt modellen klarte å kvantifisere bygninger som tidligere har opplevd flomskader, da denne informasjonen er beskyttet av personvernloven. Dersom det åpner seg mulighet for å gjøre dette på et senere tidspunkt, hadde dette vært en bedre indikator på hvorvidt modellen klarer å korrekt kvantifisere flomutsatte bygninger. Finans Norge opplyste blant annet om at Asker kommune arbeidet med å undersøke bruken av adresser knyttet til flomutsatte hus til å bedre arbeidet med tiltak, så det er mulighet for dette i fremtiden.

Kost-nyttmodellen ble kalibrert mot ekstremhendelsen sjette august 2016. Etter kalibreringen klarte modellen å gjengi kostnadene fra hendelsen med tilfredsstillende nøyaktighet. Det må påpekes at skadeutfallet innenfor modelleringsområdet ble estimert ut fra skadedataen for hele Bærum kommune, og at skadene reelt sett kan ha fordelt seg annerledes. Samtidig klarte den kalibrerte kost-nyttmodellen å forutsi den forventede årlige skaden innenfor et rimelig intervall av det som har blitt observert de siste 10 år, noe som indikerer at modellen klarer å modellere en sammenheng. Ideelt sett skulle flere datapunkt vært benyttet i analysen, men skadedataen fra Finans Norge strekker seg dessverre kun 10 år tilbake i tid. Ideelt sett skulle også kost-nyttmodellen vært kalibrert mot flere hendelser enn sjette august 2016, men dette kan være krevende da det ikke forekommer hendelser som gir betydelig skader så ofte.

Det ble funnet at det er betydelige usikkerheter knyttet til kost-nytteanalysen. Usikkerheten kan deles i to, usikkerhet knyttet til grunnlagsdata og usikkerhet knyttet til

utregningene i modellen. Grunnlagsdataen baserer seg hovedsaklig på flomresultater fra flommodellen og kostnad og sårbarhetstall hentet fra Sælthun (2018). Flomresultatene viste seg å være spesielt usikre for lavere gjentaksintervall, noe som påvirket beregningen av forventet årlig skade. I tillegg knyttet det særlig usikkerhet til aspekter som infiltrasjon, nedbør og interaksjon mellom overflate og ledningsmodell. Kostnadsdataen og sårbarhetstallene er det også knyttet usikkerheter til, men ved å bruke Monte Carlo simulering kunne denne usikkerheten modelleres. Det er viktig å påpeke at usikkerheten til grunnlagsdataen benyttet til kost-nytteanalyser vil være lik, uavhengig av hvordan selve kost-nytteanalysen gjennomføres.

Totalt sett konkluderes det med at kost-nyttmodellen klarer å kvantifisere flomutsatte objekter på høyde med hva som kan forventes ved en manuell optelling. Modellen regnes dog for ikke å være god nok til å kunne benyttes som beslutningsgrunnlag. Dette skyldes hovedsakelig manglende analyse av flere, viktige, kostnadsparametere, både innenfor materielle og immaterielle kostnader. Dette kan heldigvis implementeres på et senere tidspunkt.

6.1 Videre arbeid

Det er mange aspekter av kost-nyttmodellen som er interessant å videreutvikle. Først og fremst hadde det vært interessant å se en komplett modell, hvor et bredere register av kostnader ble analysert. Av spesiell interesse er kanskje kostnadene knyttet til immaterielle goder, slik som tidstap. Ettersom MIKE FLOOD kan gi resultater på hvor lenge en celle har en viss vannmengde vil det kunne være muligheter for å lage en modell som estimerer et slikt tap. Det er også flere aspekter ved kost-nyttmodellen som hadde vært interessant å analysere. Følgende punkter kan nevnes:

- Sjekke betydningen av å variere kostnadstallene benyttet i modellen
- Prøve og sammenligne andre modeller for kvantifisering av flomutsatte bygninger

Referanser

- Andersen, C. S. (2017). Ekstremnedbør i Asker kommune 6. august 2016. Analyse av hendelse og analyse av hendelsens påvirkning på avløpsnett. Ph.d.-avh. Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet: 47.
- Armbrecht, J., Handelshögskolan vid Göteborgs universitet. Företagsekonomiska institutionen. og Ineko) (2012). *The value of cultural institutions measurement and description*. BAS. URL: <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/30684> (sjekket 13.05.2019).
- Ballesteros, J., Bodoque, J., Díez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M. og Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology* 403 (1-2): 103–115. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2011.03.045](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.03.045).
- Bates, P. og De Roo, A. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236 (1-2): 54–77. DOI: [10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X).
- Bærumkommune (2017). *Kommunplan 2017-2035, VEDLEGG 5.4*. Tekn. rapp. Bærum kommune: 3. URL: <https://www.baerum.kommune.no/innsyn/politikk/wfdocument.ashx?journalpostid=2017218887%7B%5C%7Ddokid=3747853%7B%5C%7Dversjon=3%7B%5C%7Dvariant=A%7B%5C%7D> (sjekket 13.05.2019).
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R. og Markhus, E. (1997). *Anvendt Urbanhydrologi*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Chen, A. S., Djordjević, S., Leandro, J. og Savić, D. A. (2007). The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks. *Novatech 2007*: 465–472. DOI: [2042/25250](https://doi.org/2042/25250).
- Chen, A. S., Evans, B., Djordjević, S. og Savić, D. A. (2012a). A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. *Journal of Hydrology* 426-427: 1–16. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2012.01.007](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.01.007).
- Chen, A. S., Evans, B., Djordjević, S. og Savić, D. A. (2012b). Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations. *Journal of Hydrology* 470-471: 1–11. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2012.06.022](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.06.022).
- Chen, A. S., Leandro, J. og Djordjević, S. (2016). Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations. *Urban Water Journal* 13 (8): 830–840. DOI: [10.1080/1573062X.2015.1041991](https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1041991).
- Chin, D. A. (2013). *Water-Resources Engineering*. 3rd. Pearson: 412, 495.
- DHI (2009). *MOUSE Pipeflow - Reference manual*. Tekn. rapp. DHI. URL: <http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/MOUSEPipeFlowReference.pdf>.
- DHI (2016). *MIKE 21 Flow Model & MIKE21 Flood Screening Tool - Hydrodynamic Module - Scientific Documentation*. Tekn. rapp.: 45–48. URL: <http://manuals.mikepoweredbydhi>.

- [help/2017/Coast%7B%5C_%7Dand%7B%5C_%7DSea/M21HDFST%7B%5C_%7DScientific%7B%5C_%7DDoc.pdf](#) (sjekket 13.05.2019).
- Dyrørdal, A. V. (2012). *Estimation of extreme precipitation in Norway and a summary of the state-of-the-art*. Tekn. rapp. Norwegian Metrological Institute.
- FinansNorge (2011). *Kodeverk for vannskader*. URL: <https://www.finansnorge.no/statistikk/skadeforsikring/vask/> (sjekket 13.05.2019).
- Fraga, I., Cea, L. og Puertas, J. (2017). Validation of a 1D-2D dual drainage model under unsteady part-full and surcharged sewer conditions. *Urban Water Journal* 14 (1): 74–84. DOI: [10.1080/1573062X.2015.1057180](https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1057180).
- Friborg, T. og Deggerdal, G. (2017). *Overvannskartlegging Nadderud*. Tekn. rapp. Sweco.
- Geovekst (2013). *SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for Felles KartdataBase (FKB)*. Tekn. rapp. Geovekst. URL: <https://kartverket.no/globalassets/standard/sosi-kap3-produktspesifikasjoner/fkb02/0-generelldel-2013-01-01.pdf> (sjekket 13.05.2019).
- Gilles, D. og Moore, M. (2010). *Review of Hydraulic Flood Modeling Software used in Belgium, The Netherlands, and The United Kingdom*. Tekn. rapp. URL: https://www.iihr.uiowa.edu/education1/international/UK/projects%7B%5C_%7Dfiles/ipwrsm%7B%5C_%7Dpaper%7B%5C_%7Dgilles%7B%5C_%7Dmoore%7B%5C_%7DDan%7B%5C_%7Deditted.pdf (sjekket 13.05.2019).
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., Sundby, S., Vasskog, K. og Ådlandsvik, B. (2009). *Klima i Norge 2100: Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning*. Tekn. rapp. Norsk klimasenter. URL: www.klimatilpasning.no (sjekket 13.05.2019).
- Heber Green, W. og Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Science* 4 (1): 1–24. DOI: [10.1017/S0021859600001441](https://doi.org/10.1017/S0021859600001441).
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 14 (1): 446–460. DOI: [10.1029/TR014i001p00446](https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446).
- Hov, Ø., Cubasch, U., Fischer, E., Höpfe, P., Iversen, T., Kvamstø, N. G., Kundzewicz, Z. W., Rezacova, D., Rios, D., Santos, F. D., Schädler, B., Veisz, O., Zerefos, C., Benestad, R., Murlis, J., Donat, M., Leckebusch, G. C. og Ulbrich, U. (2013). *Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation*. Tekn. rapp. October. Norwegian Meteorological Institute.
- Hoven, L. E., Bramslev, J. P., Sælthun, N. R., Valla, T. og Flatlandsmo, I. (2018). *Klimatilpassing: Kost-/nytteanalyse for overvannstiltak langs vei*. Tekn. rapp. Oslo: Multiconsult. URL: <http://www.miljokommune.no/Global/Klima/Webinarer/Kost%20nytteanalyse%20for%20bruk%20av%20vei%20som%20flomvei.pdf> (sjekket 13.05.2019).
- Karlsson, S. og Larsson, M. (2014). Cost-benefit analysis A tool for decision-making in pluvial flood risk management. Masteroppg.
- Kourtis, I., Tsihrintzis, V. og Bellos, V. (2017). Comparison of 1D-1D and 1D-2D urban flood models. I:
- Larsen, A. N., Gregersen, I. B., Christensen, O. B., Linde, J. J. og Mikkelsen, P. S. (2009). Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science and Technology* 60 (9): 2205–2216. DOI: [10.2166/wst.2009.650](https://doi.org/10.2166/wst.2009.650).
- Lekuthai, A. og Vongvisessomjai, S. (2001). Intangible Flood Damage Quantification. *Water Resources Management* 15 (5): 343–362. DOI: [10.1023/A:1014489329348](https://doi.org/10.1023/A:1014489329348).

- Magnussen, K., Wingstedt, A., Rasmussen, I. og Reinvang, R. (2015). *Kostnader og nytte ved overvannstiltak*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M305/M305.pdf> (sjekket 13.05.2019).
- Mark, O., Hénonin, J., Domingo, N., Russo, B., Chen, A. og Djordjević, S. (2014). Report and papers with guidelines on calibration of urban flood models. URL: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/21227> (sjekket 13.05.2019).
- Messner, F., Penning-rowsell, E., Green, C., Tunstall, S., Veen, A. V. D., Tapsell, S., Wilson, T., Krywkow, J., Logtmeijer, C., Fernández-bilbao, A., Geurts, P. og Haase, D. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. Tekn. rapp.
- Nilsen, V. (2017). *IDF-statistics and expected annual damage*. Tekn. rapp. Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet: 3.
- NorskKlimaservicesenter (2017). *Klimaprofil Oslo og Akershus Et kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning*. Tekn. rapp. URL: https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klimaprofiler/klimaprofil-oslo-og-akershus/%7B%5C_%7Dattachment/12036?%7B%5C_%7Dts=15d9d3c7ba3 (sjekket 13.05.2019).
- NOU1998:16 (1998). *Nytte-kostnadsanalyser - Veiledning i bruk av lønnsomhetsvurderinger i offentlig sektor*. Tekn. rapp. Oslo: Finans- og tolldepartementet: 60.
- NOU2012:16 (2012). *Samfunnsøkonomiske analyser*. Tekn. rapp. Oslo: Finansdepartementet: 169. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f956d51364811b8547eebdbcde52c/no/pdfs/nou201220120016000dddpdfs.pdf> (sjekket 13.05.2019).
- NOU2015:16 (2015). *Overvann i byer og tettsteder*. Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon Informasjonsforvaltning. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/e6db8ef3623e4b41bcb81fb23393092b/no/pdfs/nou201520150016000dddpdfs.pdf> (sjekket 13.05.2019).
- 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 (Switzerland)*. DOI: [10.3390/w7010255](https://doi.org/10.3390/w7010255).
- Ragulina, G. og Taurisano, A. (2014). *Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller ? Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller ? Manual for å beregne returverdier av nedbør for*. Tekn. rapp. 22. URL: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2014/rapport2014%7B%5C_%7D22.pdf (sjekket 13.05.2019).
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics* 1 (5): 318–333. DOI: [10.1063/1.1745010](https://doi.org/10.1063/1.1745010).
- Rossmann, L. A. (2017). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*. Tekn. rapp.
- Saghafian, B. og Julien, P. (1995). Time to equilibrium for spatially variable watersheds. *Journal of Hydrology* 172 (1-4): 231–245. DOI: [10.1016/0022-1694\(95\)02692-I](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02692-I).
- Sælthun, N. R. (2018). *Nytte/kost-verktøy NKA-2016 v 1.30*. Tekn. rapp. URL: http://www.miljokommune.no/Global/Klima/Webinarer/2018-06-10%7B%5C_%7DBrukerveiledning%20NKA2016%7B%5C_%7D1%7B%5C_%7D30.pdf (sjekket 13.05.2019).
- Solheim, E. B. (2017). *Infiltrasjon for lokal overvannsdiskontering (LOD) : vurdering av metoder for å måle infiltrasjon på lokal tomt*. URL: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2443302/Masteroppgave%7B%5C_%7DSolheim%7B%5C_%7D2017%7B%5C_%7DNMBU.pdf?sequence=1%7B%5C_%7D&%7DIsAllowed=y%20https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2443302 (sjekket 13.05.2019).

- Thorolfsson, S. T. (2011). Sandfang må vedlikeholdes. I: *Norsk Vann bulletin*. Bd. 4. Norsk Vann: 38–39.
- Torgersen, G. og Navrud, S. (2018). Singing in the rain: Valuing the economic benefits of avoiding insecurity from urban flooding. *Journal of Flood Risk Management* 11 (4): e12338. DOI: [10.1111/jfr3.12338](https://doi.org/10.1111/jfr3.12338).
- Wang, Y., Chen, A. S., Fu, G., Djordjević, S., Zhang, C. og Savić, D. A. (2018). An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. *Environmental Modelling & Software* 107: 85–95. DOI: [10.1016/J.ENVSOFT.2018.06.010](https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2018.06.010).
- Zhou, Q., Mikkelsen, P. S., Halsnæs, K. og Arnbjerg-Nielsen, K. (2012). Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.11.031](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.031).
- Zhou, Q., Panduro, T. E., Thorsen, B. J. og Arnbjerg-Nielsen, K. (2013). Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system: An integrated hydrological cost-benefit analysis. *Environmental Management*. DOI: [10.1007/s00267-012-0010-8](https://doi.org/10.1007/s00267-012-0010-8).

Vedlegg A. Beregningsmetoder i Python-skriptet

Koden til kost-nyttmodellen er på over 1000 linjer og egner seg ikke å gjengi i helhet i oppgaven. Derfor gis heller en beskrivelse av de viktigste funksjonene/metodene benyttet i oppgaven. Koden inneholder tre ulike klasser. Først klassen ”**RasterCBA**” som inneholder alle metodene som kvantifiserer flomutsatte objekter (bygninger, veger, biler), deretter en klasse for hver av objekttypene på overordnet nivå (**InitiateBuildings** og **InitiateRoads**), disse metodene er tilnærmet identiske, kun enkelte forskjeller for bygninger ettersom det defineres et omriss. Avslutningsvis er det klassen ”**MonteCarloCostCalc**” som utfører selve beregningen i oppgaven ved å kalle på de andre klassene. Klassene går gjennom steg for steg.

A.1 RasterCBA

Initiate_costs()

Metode som oppretter en dictionary over kostnad- og sårbarhetsverdiene som benyttes i oppgaven.

randomize_vuln()

Trekker nye sårbarhetsverdier for de ulike objektene i dictionaryen opprettet i **Initiate_costs()**. Sårbarhetsverdiene trekkes fra et uniformt utvalg ved **numpy.uniform**

affected_”object”()

Finner hvilke objekter som er utsatt for flomvann ved bruk av metodikken presentert i kapittel 3. Bruker flomrasteret sammen med rasterne fra FKB-dataen som er definert i **Initiate**-klassene.

cost_calculation()

Benytter dataen over flomutsatte objekt sammen med kostnads- og sårbarhets verdiene fra **Initiate_costs()** til å beregne en kostnad for et objekt ved ligning 3.1

`save_to_gdb()` Lagrer en matrise tilbake som raster-objekt i ArcGIS. Kan benyttes for å lage figurer som 4.7.

A.2 Initiate_”object”

`initiate_”object”()` Laster inn rasteret i Python og gjør den nødvendige konverteringen med ArcPy, blant annet ved metodene `arcpy.Raster()` og `arcpy.RasterToNumpyArray()`. Metoden sammenligner også den geografiske og dimensjonelle informasjonen mellom rasterne.

A.3 MonteCarloCostCalc

`ead_calculation()` Kaller på `cost_calculation()`-metoden fra `RasterCBA` til å kjøre kostnaden n ganger. Kan også styre hvilke kostnadsparametere som skal være med i beregninger (biler, bygninger, vegger osv).

MonteCarloCostCalc kan også utføre nåverdiberegning og lignende, men ettersom dette bare er enkle ligninger er de ikke tatt med.

Vedlegg B. Kostnad- og sårbarhetstall

Tabell B.1: Kostnader og sårbarhetsverdier for kategorien bygninger, hentet fra Sælthun (2018), justert via Hoven mfl. (2018)

Type	Sårbarhetstall ved dybde			Pris per m ²		Totalpris per m ²
	U.etasje ^a	0-1 m ^b	>1 m ^b	Byggekost	Innbo	
Anneks	0.02	0.3	0.5	5601	1120	6721
Barnehage	0.02	0.2	0.3	21469	8588	30057
Boligbygg	0.02	0.2	0.4	21469	10735	30523
Brann og ambulanse	0.02	0.2	0.3	18669	7468	26138
Forretninger	0.02	0.2	0.3	18669	7468	26136
Helseinstitusjoner	0.02	0.2	0.3	24763	9894	34657
Hotell og restaurant	0.02	0.2	0.3	18669	7468	26137
Industri	0.02	0.2	0.3	11201	4481	15682
Kultur og idrett	0.02	0.2	0.3	18669	7468	26136
Skole	0.02	0.2	0.3	28003	11201	39204

^a Ved underetasje så settes en vanddybde som antar at gir kjelleroversvømmelse

^b Definert 0 som sokkelen av grunnmuren på huset, dette må tas høyde for

Tabell B.2: Kostnader og sårbarhetsverdier for kategorien veger og t-bane, hentet fra Sælthun (2018), justert via Hoven mfl. (2018)

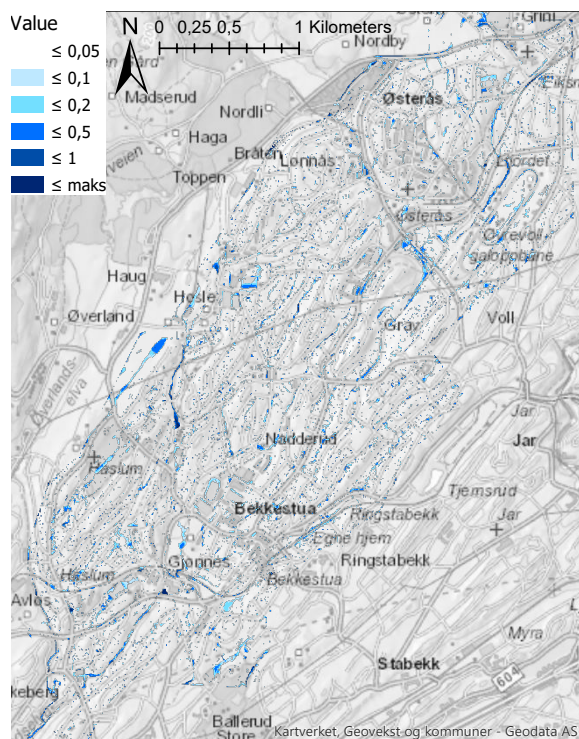
Type	Sårbarhetstall	Antatt bredde	Totalpris per m ² ^a
		m	
Privat veg	0.035	3,5	247
Kommunal veg	0.01	6	3601
Fylkesveg	0.05	7,5	8643
T-bane	0.035	4	13504

^a Prisen egentlig oppgitt per meter, tilpasning ved bruk av omtrentlig bredde

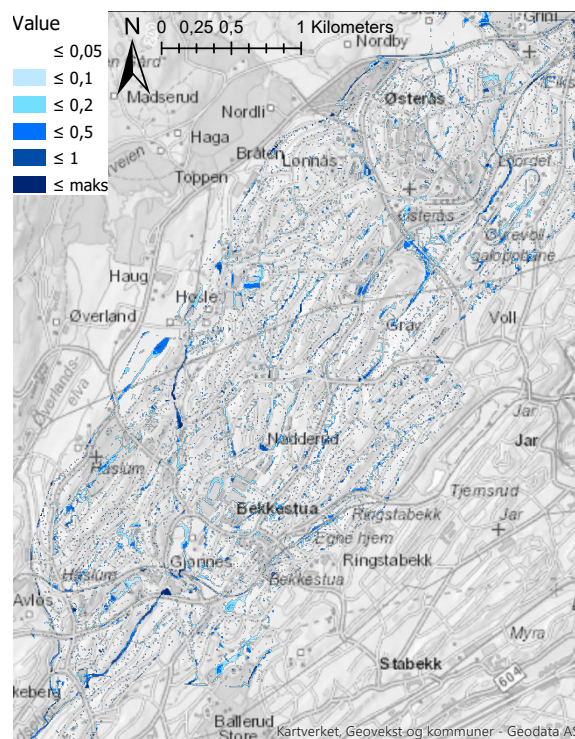
Tabell B.3: Kostnader og sårbarhetsverdier for biler, hentet fra Sælthun (2018) og Karlsson og Larsson (2014)

Type	Sårbarhetstall ved dybde			Gjennomsnittspris
	< 0.5m	0.5-0.7m	>0.7m	
Biler	0.15	0.6	0.7	108034

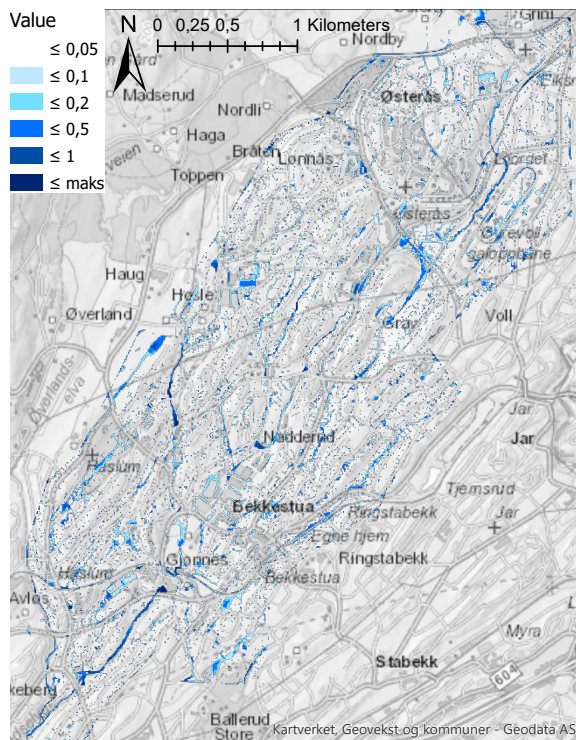
Vedlegg C. Flommodelleringsresultater



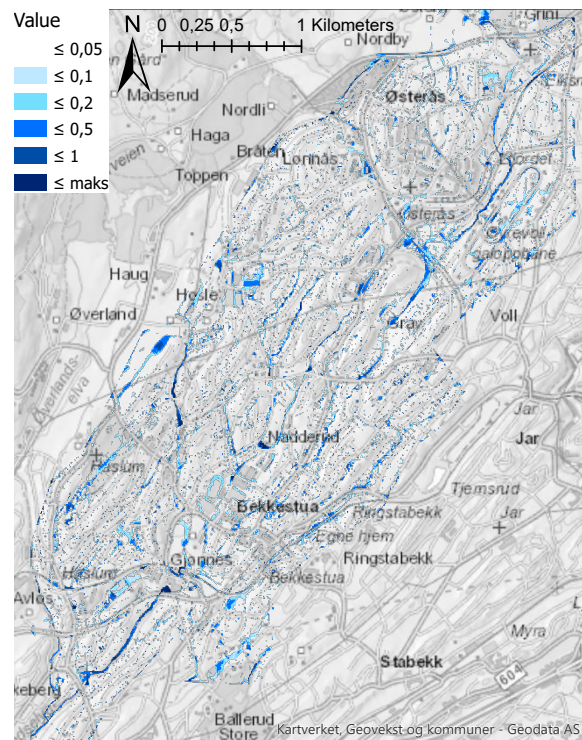
Figur C.1: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 5 år



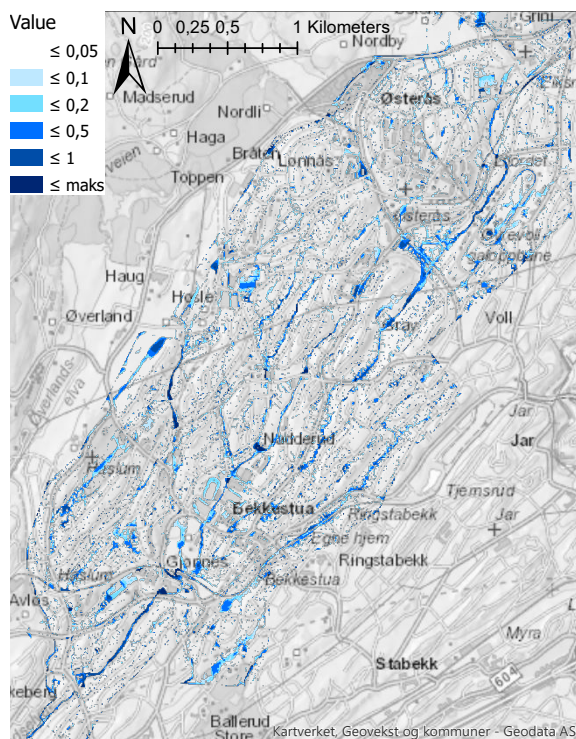
Figur C.2: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 10 år



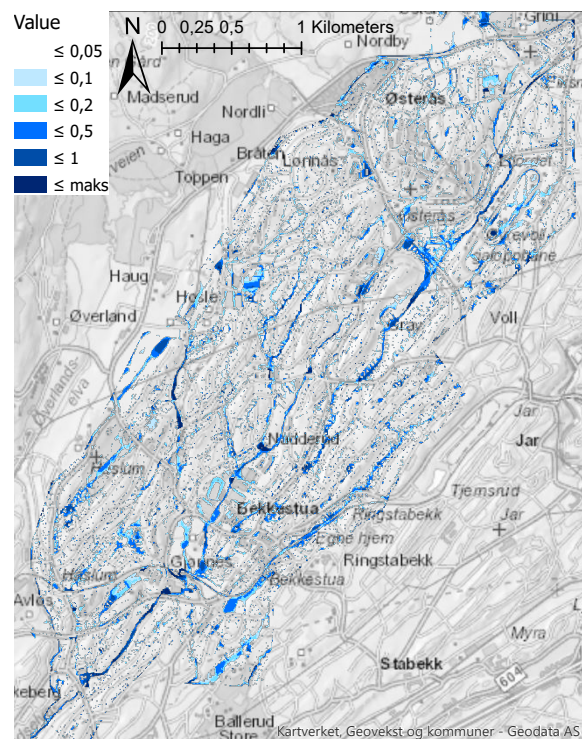
Figur C.3: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 15 år



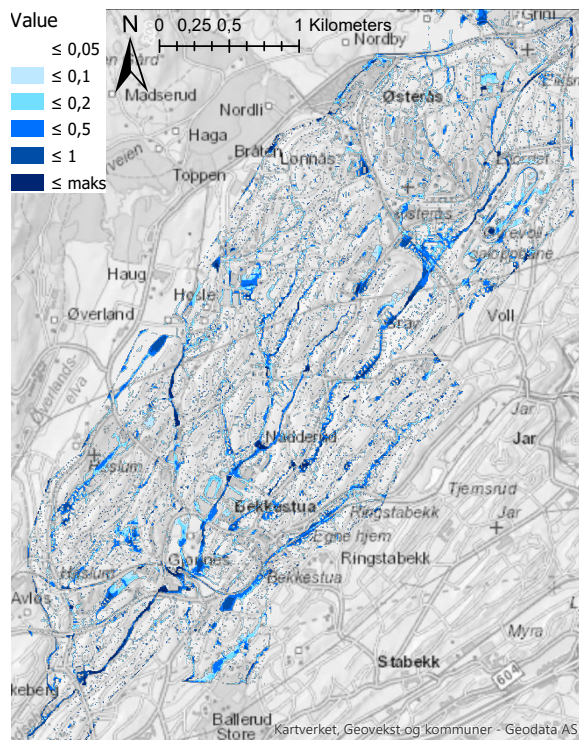
Figur C.4: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 20 år



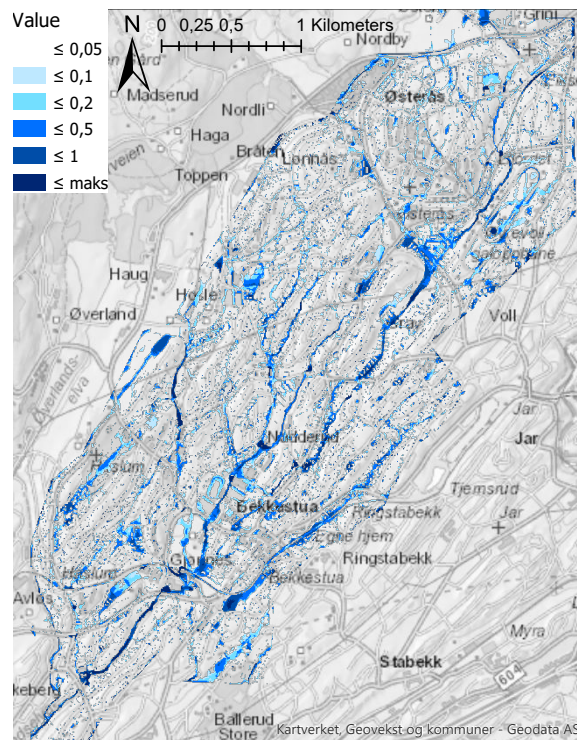
Figur C.5: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 50 år



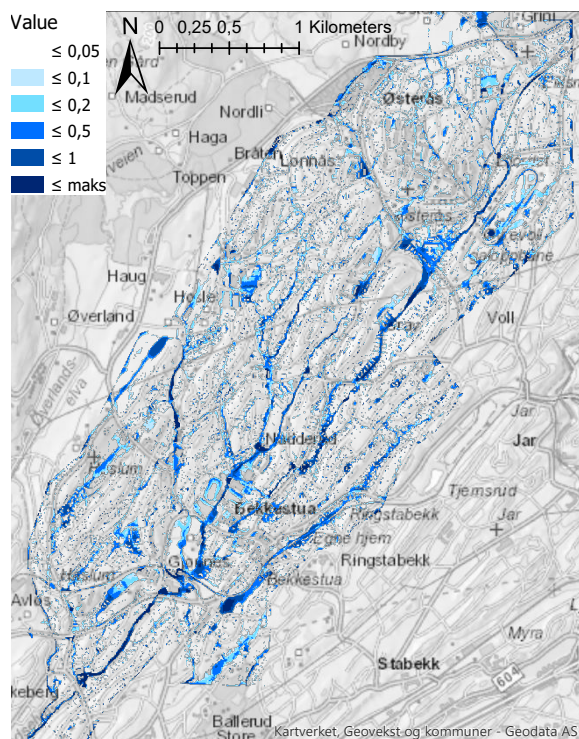
Figur C.6: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 100 år



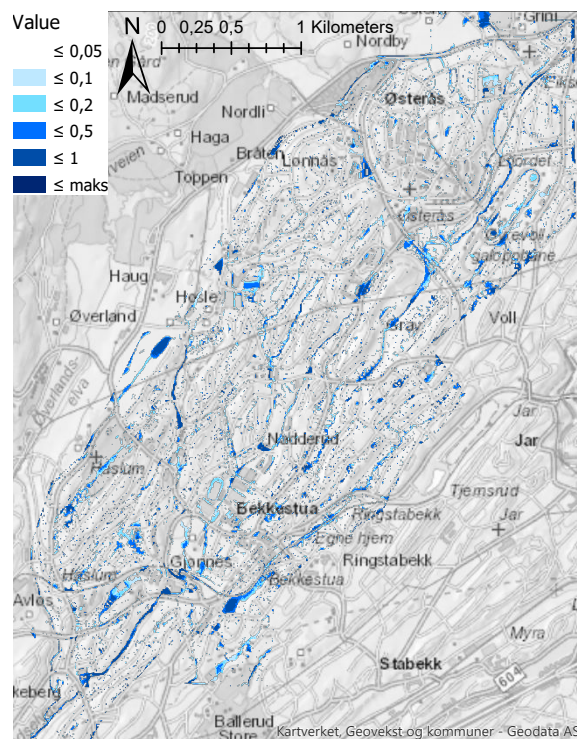
Figur C.7: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 200 år



Figur C.8: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 500 år



Figur C.9: Maksimalvannstand i meter, ved nedbør med gjentakintervall 1000 år



Figur C.10: Maksimalvannstand i meter, ved nedbørshendelsen sjette august 2016.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway