



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Kvantifisering av usikkerhet ved utforming og anlegging av regnbed

Quantification of uncertainty in the design and
construction of raingardens

Mina Pashtouei
Industriell økonomi

Forord

Denne masteroppgaven er utført som et endeligresultat på min mastergrad i industriell økonomi med fordypning i vann- og miljøteknikk ved Norge miljø- og biovitenskapelige universitet, NMBU. Oppgaven ble skrevet våren 2023, omfatter 30 studiepoeng, og handler om analyse av usikkerhet i den rasjonale formel, regnbedareal og kostnader for regnbed som LOD-tiltak i urbane områder.

En stor takk til min hovedveileder Kim Aleksander Haukeland Paus, som har vært tilgjengelig for veiledning gjennom hele arbeidet med gode diskusjoner og konstruktive tilbakemeldinger. I tillegg vil jeg takke alle som har lagt av tid til å svare på e-postene knyttet til kostnader for regnbed.

Til sist vil jeg takke min familie og nære venner som har gitt meg kontinuerlig støtte og motivasjon gjennom hele studietiden.

Vestby, 11. mai 2023
Mina Pashtouei

Sammendrag

Klimaendringer og intensiv nedbør sammen med økt fortetting forårsaker raskt og store mengder overvann i urbane områder. Dette kan gi store skader på bygninger og infrastruktur. For å håndtere overvann, anbefales det å iverksette tiltak basert på tretrinnsstrategi. Trinn 1 skal fange opp og infiltrere mindre nedbør, mens trinn 2 fokuserer på å forsinke og fordrøye større nedbør og trinn 3 sikrer trygge flomveier.

Den rasjonale formelen er kjent som internasjonal metode for dimensjonering av overvannstiltak i urbane områder. Samtidig er det stor fokus på å implementere lokale overvannstiltak, som regnbed for å håndtere overvann i urbane områder. Parameterne som nedbørintensitet, avrenningskoeffisient, hydraulisk konduktivitet og maksimal vannstand, som inngår i beregningene variere betydelig. Til tross for dette blir de antatt som faste verdier basert på flere antakelser og forenklinger. Usikkerheten bidrar til over- eller underdimensjonering av tiltaket. Det argumenteres også sterkt for at kostnadene for LOD-tiltak som regnbed er antatt å variere med størrelse på tiltaket, geografisk område og utforming, samt diskonteringsrente for tiltakets fremtidige driftskostnad. For å øke presisjonen til regnbed, er det behov for å kvantifisere hvilken usikkerhet som finnes, og hvordan de enkelte variablene bidrar til den totale usikkerheten.

Det finnes ingen tidligere studier om analyse av usikkerhet i regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed. Formålet med denne oppgaven er å analysere og synliggjøre denne usikkerheten via Monte Carlo simulering. Metoden simulerer usikkerhet ved hjelp av et stort antall tilfeldige verdier. Det ble tilknyttet ulike statistiske fordelinger til inngangsparameterne, basert på statistiske tester og litteraturstudier. Diskonteringsperiode ble antatt som en fast verdi på 40 år. Usikkerheten beskrives ved hjelp av 5- og 95-persentil av Monte Carlo simuleringene.

Denne studien viser til stor usikkerhet knyttet inngangsparameterne. I den rasjonale formelen har nedbørintensitet og avrenningskoeffisient størst variabilitet, hvor størrelsen på bidraget til usikkerhet varierer avhengig av valgt varighet og gjentaksintervall. Usikkerhetsanalyse av regnbedareal viste at hydraulisk konduktivitet, fulgt av maksimal vannstand i regnbed er de viktigste inngangsparameterne, og hadde størst påvirkning på den totale usikkerheten. Når det kommer til nåverdikostnad av regnbed ble det funnet at enhetskostnad for etablering, hydraulisk konduktivitet og til sist enhetskostnad for drift er de mest usikre inngangsparameterne og har store bidrag til total usikkerhet.

Usikkerheten kan reduseres betydelig ved å redusere variasjonen i inngangsparameterne med størst usikkerhetsbidrag. Disse inkluderer avrenningskoeffisient, mettet hydraulisk konduktivitet, maksimal vannstand, samt enhetskostnad for etablering og drift av regnbed.

Summary

Climate change with intensive rainfall and increased urbanization cause rapid and large amount of stormwater in urban areas. This can cause damages to buildings and infrastructure. To manage stormwater and meet challenges, it is recommended to implement measures based on the three-step strategy for surface water management. Step 1 have the purpose to capture and infiltrate minor rainfall, while step 2 focuses on delaying larger rainfall and step 3 ensures safe floodways.

The rational formula is known as an international method for dimensioning stormwater measures in urban areas. On the other side, there is a great focus on implementing LID-measures, such as raingardens to manage stormwater in urban areas. Rainfall intensity, runoff coefficient, hydraulic conductivity, and maximum water level on the surface of raingarden included in the calculations vary significantly. However, they are assumed to be fixed values based on several assumptions and simplifications. The uncertainty regarding the fixed values contributes to over- or under-dimensioning of the measures. The cost of LID-measures such as raingardens are assumed to vary with the size of the measure, geographical area, and design, as well as the discount rate for the measures future operating cost. To increase the precision of LID-measures such as raingardens, there is a need to quantify what uncertainty exists, and how the individual input parameters contribute to the total uncertainty.

There are no previous studies on the analysis of uncertainty around raingardens and the present value cost of raingardens. The purpose of this study is to analyze and visualize uncertainty through Monte Carlo simulation. The method simulates uncertainty using many random values. Different statistical distributions were assigned to input parameters based on statistical tests and literature studies. The discounting period was assumed as a fixed value of 40 years. Uncertainty is described using the 5th and 95th percentiles of the Monte Carlo simulations.

This study shows great uncertainty related to the input parameters. In the rational formula, rainfall intensity and runoff coefficient have the greatest variability, where the contribution to uncertainty varies depending on the selected duration and return time. Uncertainty analyses of raingarden area showed that hydraulic conductivity, followed by maximum water level on the surface are the most important input parameters, and had the greatest influence on the total uncertainty in raingardens. Regarding the cost of raingardens, the input parameters that have the most uncertainty in estimating the cost are the unit cost of establishment, hydraulic conductivity and operation and maintenance cost.

The uncertainty can be significantly reduced by carrying out various measures to reduce uncertainty in the input parameters with the greatest contribution to uncertainty. These includes runoff coefficient, hydraulic conductivity, as well as unit cost for establishing and operating raingardens.



Innhold

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
SUMMARY	III
INNHold	V
FIGURER	VII
TABELLER	VIII
FORKORTELSER	IX
1 INTRODUKSJON	1
1.1 MÅL FOR OPPGAVEN	3
1.2 STRUKTUR I OPPGAVEN	3
2 METODE	4
2.1 FLYTSKJEMA	4
2.2 FORMELVERK.....	5
2.2.1 Den rasjonale formel.....	5
2.2.2 Overflateareal regnbed	5
2.2.3 Kostnader regnbed	6
2.3 USIKKERHETSANALYSE.....	7
2.3.1 Statistiske tester.....	7
2.3.2 Monte Carlo simuleringer.....	7
2.3.3 Oppsett for Monte Carlo i R.....	10
2.4 INNGANGSPARAMETERE.....	11
2.4.1 Avrenningskoeffisient (φ)	11
2.4.2 Nedbør (P).....	12
2.4.3 Varighet (t_r).....	13
2.4.4 Klimafaktor (K_f)	13
2.4.5 Hydraulisk konduktivitet (K_{sat}).....	13
2.4.6 Maksimal vannstand (h_{maks}).....	13
2.4.7 Etableringskostnad (K_e)	14
2.4.8 Driftskostnad (K_{dr})	14
2.4.9 Diskonteringsrente (r).....	14
2.4.10 Diskonteringsperiode (n)	15
2.5 CHATGPT	15
3 RESULTATER OG DISKUSJON	16
3.1 SANNSYNLIGHETSFORDELING AV PARAMETERE.....	16
3.1.1 Hydrologisk størrelser.....	16
3.1.2 Feltkarakteristikk	18
3.1.3 Tiltakskarakteristikk.....	19
3.1.4 Kostnader	20
3.2 KVANTIFISERING AV USIKKERHET.....	22
3.2.1 Dimensjonerende overvannsvolum	22
3.2.2 Overflateareal regnbed	28
3.2.3 Kostnader	30
3.3 REDUKSJON AV USIKKERHET	32
3.3.1 Avrenningskoeffisient (φ)	32
3.3.2 Hydraulisk konduktivitet (K_{sat}).....	32
3.3.3 Maksimal vannstand (h_{maks}).....	33

3.3.4	<i>Etablerings- og driftskostnader (K_e og K_{dr})</i>	33
3.3.5	<i>Diskonteringsrente (r)</i>	34
3.4	VURDERING AV RESULTATENE.....	34
4	KONKLUSJONER	35
4.1	VIDERE ARBEID.....	36
	REFERANSER	37
	VEDLEGG A: KODE FOR MONTE CARLO AV DEN RASJONALE FORMELEN	39
	VEDLEGG B: KODE FOR MONTE CARLO AV REGNBEDAREAL	40
	VEDLEGG C: KODE FOR MONTE CARLO AV KOSTNADER FOR REGNBED	41
	VEDLEGG D: INPUTDATA FOR AVRENNINGSKOEFFISIENT	42
	VEDLEGG E: IVF-STATISTIKK FRA BLINDEREN PLU	43
	VEDLEGG F: DATA FOR HYDRAULISK KONDUKTIVITET OG MAKSIMAL VANNSTAND	43
	VEDLEGG F: ETABLERTE REGNBED I OSLO	44
	VEDLEGG G: DATA FOR ETABLERINGSKOSTNAD VED REGNBED	44
	VEDLEGG H: DATA FOR DRIFTSKOSTNAD VED REGNBED	45

Figurer

Figur 1: Oppsummert beskrivelse av metodene og prosessen for å utføre usikkerhets- analysene.....	4
Figur 2: GEV-fordeling av nedbør for 2 år gjentaksintervall og 5 min varighet, utført for en million Monte Carlo simuleringer.....	17
Figur 3: Uniformfordeling av klimafaktor for en million Monte Carlo simuleringer.....	18
Figur 4: Trekantfordeling av avrenningskoeffisient for 5 min varighet ved en million Monte Carlo simuleringer.....	18
Figur 5: Lognormalfordeling av hydraulisk konduktivitet for en million Monte Carlo simuleringer.....	19
Figur 6: Trekantfordeling for maksimal vannstand for en million Monte Carlo simuleringer....	20
Figur 7: Lognormalfordeling av enhetskostnad for etablering av regnbed for en million Monte Carlo simuleringer.....	20
Figur 8: Gammafordeling av enhetskostnad for drift av regnbed for en million Monte Carlo simuleringer.....	21
Figur 9: Gammafordeling av diskonteringsrente for en million Monte Carlo simuleringer.....	21
Figur 10: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentaksintervall på 2 år og varighet på 30 min, simulert via Monte Carlo.....	22
Figur 11: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentaksintervall på 2 år og varighet på 60 min, simulert via Monte Carlo.....	23
Figur 12: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentaksintervall på 2 år og varighet på 120 min, simulert via Monte Carlo.....	23
Figur 13: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentaksintervall på 20 år og varighet på 30 min, simulert via Monte Carlo.....	24
Figur 14: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentaksintervall på 20 år og varighet på 60 min, simulert via Monte Carlo.....	25
Figur 15: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentaksintervall på 20 år og varighet på 120 min, simulert via Monte Carlo.....	25
Figur 16: Sannsynlighetsfordelinger av f for gjentaksintervall på 2 år simulert med Monte Carlo.....	28
Figur 17: Sannsynlighetsfordelinger av f for gjentaksintervall på 20 år simulert med Monte Carlo.....	29
Figur 18: Sannsynlighetsfordelinger av nåverdikostnad for regnbedareal som andel av nedbørsfelt dimensjonert for gjentaksintervall på 2 år, simulert med Monte Carlo.....	31

Tabeller

Tabell 1: Fordeling og verdier av inngangsparameterne brukt til å gjennomføre Monte Carlo simuleringene.....	8
Tabell 2: Faste verdier av inngangsparameterne brukt til å finne inngangsparameterens bidrag til usikkerhet ved spesifikk dimensjonerende vannføring, regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed.....	10
Tabell 3: P-verdi som resultat av de statistiske testene for K_{sat} , K_e og K_{dr} brukt til å finne fordelingen som tilknyttes disse parameterne.....	16
Tabell 4: Resultat av Monte Carlo simuleringene for uniform- og trekantfordeling av klimafaktoren (K_r) som ble basert på verdiene fra Tabell 1.....	17
Tabell 5: 5- og 95-persentiler for spesifikk dimensjonerende vannføring ved 2 års og 20 års gjentakintervall og 30, 60 og 120 min varighet. Persentilene presenterer usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring når en bestemt inngangsparameter er satt til en fast kjent verdi basert på Tabell 2.....	26
Tabell 6: Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring (q_{dim}) for valgte gjentakintervall (2, 5, 10, 20, 25 og 50 år) med 30, 60 og 120 min varighet.....	27
Tabell 7: 5- og 95-persentilene for andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt (f) ved 2 års og 20 års nedbør. Persentilene presenterer usikkerhet i f når en bestemt inngangsparameter er satt til en fast kjent verdi basert på verdiene fra Tabell 2.....	29
Tabell 8: Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt (f) for de valgte gjentakintervall (2, 5, 10, 20, 25, 50 år).....	30
Tabell 9: 5- og 95-persentilene for nåverdikostnad av regnbed ($K_{regnbed}$) ved 2 års nedbør. Persentilene presenterer usikkerhet i $K_{regnbed}$ når en bestemt inngangsparameter er satt til en fast kjent verdi basert på verdiene fra Tabell 2.....	31
Tabell 10: Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i nåverdikostnad for regnbed, dimensjonert for nedbør av ulike gjentakintervall (2, 5, 10, 20, 25, 50 år).....	32

Forkortelser

LOD – Lokalovervannsdiskonering

IVF – Intensitet-varighet-frekvens

MET – Meteorologisk institutt

KPI – Konsumprisindeks

LID – Low impact development

1 Introduksjon

Ifølge NOU 2015: 16 (2015) er overvann all vann som renner av på overflaten som følge av nedbør og snøsmelting. Økende klimaendringer forårsaker hyppigere forekomst av intensiv nedbør. Kombinert med fortetting gir dette raske og store mengder overvann i byer og tettbygd strøk. Praktiske og økonomiske begrensninger gjør det vanskelig å håndtere problemene knyttet til overvann ved hjelp av de tradisjonelle teknikker og infrastruktur som samler opp, transporterer og lagrer overvann. Disse begrensningene kan gjøre det vanskelig å opprettholde effektiviteten og funksjonaliteten til slike systemer. I NOUen ble det estimert 1,6 til 3,6 milliarder kroner i skadekostnader som følge av overvann per år. Uten overvannstiltak er det forventet at skadene vil øke både i antall og størrelse i de kommende årene (NOU 2015: 16, 2015).

Måten overvann håndteres for å beskytte mot skader på byggverk, helse og miljø kan bli forbedret ved å iverksette forebyggende overvannstiltak (Fletcher et al., 2013; NOU 2015: 16, 2015). Norsk Vann anbefaler å legge tretrinnsstrategi til grunn for dette (Lindholm et al., 2008). Strategien deles inn i tre trinn. Trinn 1 går ut på å redusere og forsinke avrenning fra mindre nedbør ved å la det infiltrere i grunnen og fordampe fra vegetasjon og overflater. Trinn 2 skal fordrøye større nedbør, og trinn 3 vil trygd avlede de største nedbørene.

For å håndtere overvann blir ulike infrastruktur dimensjonert ofte med grunnlag i den rasjonale formelen (Stenius et al., 2015; Young et al., 2009). Regnbed er også svært viktig for lokal overvannsdisponering i urbane områder (Hunt et al., 2011; Paus & Braskerud, 2013), og brukes som et svært populært LOD- tiltak i Nord- Amerika og Australia, blant annet (Hunt et al., 2011). Den blir utformet som en forsenkning, beplantet med vegetasjon, og fungerer som en fleksibelt naturlig løsning som samler opp, fordrøyer og infiltrer overvann fra de nærliggende impermeable overflatene (Atchison et al., 2006; Paus & Braskerud, 2013). Regnbed reduserer risiko for oversvømmelse ved å holde igjen overvann på overflaten helt eller midlertidig før det infiltrerer gjennom et filtermedium. Den kommer i trinn 1 eller trinn 2 i tretrinnsstrategien, avhengig av overflateareal til regnbedet, maksimal vannstand på overflaten og filtermediets infiltrasjonskapasitet (Paus & Braskerud, 2013).

Overvann akkurat som andre hydrologiske hendelser, varierer i tid og rom. I et urbant område er nedbør en viktig nøkkelparameter for vurdering av usikkerhet i hydrologisk respons (avrenning). De tilgjengelige observasjonene på overvann, spesielt i urbane områder er lite pålitelig og preget av stor usikkerhet (Cristiano et al., 2017).

Parameterne som inngår i den rasjonale formelen samt ved dimensjonering av regnbed, er tilknyttet stor usikkerhet. Tross dette er det svært sjeldent det utføres analyse av usikkerhet ved dimensjonering av overvannstiltak. Det finnes metoder og data som kan bli benyttet til å vurdere usikkerhet. Eksempelvis publiserer Meteorologisk institutt (MET) 2,5- og 97,5-persentiler av IVF-statistikk (Dyrrdal et al., 2022). I et svensk studie skrevet av Bondeson (2021) er det også beregnet usikkerhet knyttet til valg av inngangsparametere i nedbør-avløpsmodeller og nedbørintensitet. Høy variasjon av hydrologiske egenskaper som nedbørintensitet, infiltrasjonskapasitet og avrenningskoeffisient (Bondeson, 2021; Cristiano et al., 2017; Lunde, 2020) som inngår i beregningene for den rasjonale formel og regnbed, kan føre til betydelig usikkerhet. Denne usikkerheten kan forårsake kostnader forbundet med over- eller underdimensjonering av et tiltak. Eksempelvis, et regnbed som er overdimensjonert vil ha høy

investeringskostnad og ta opp mer areal enn nødvendig for å håndtere overvann i område. På den annen side, hvis regnbedet er underdimensjonert, vil det ikke være i stand til å håndtere nødvendig mengde med overvann, og vil ikke fungere effektivt.

Utbygging av overvannstiltak som regnbed disponerer store arealer oppå bakken, dermed øker kostnadene for overvannstiltaket (Magnussen et al., 2015). For en kostnadseffektiv tilpasning over tid, bør tiltak for overvann være så forutsigbart, presist og treffsikre som mulig (NOU 2015:16, 2015). Rapporten skrevet av Magnussen et al. (2015) fra Miljødirektoratet, samt forskningsartikkelen skrevet av Siwiec et al. (2018) hevder at kostnadene for lokale overvannstiltak som regnbed varierer avhengig av faktorer som størrelsen på regnbedet, det geografiske område, valg av plantematerialer og utforming av tiltaket. I tillegg til dette, er det ofte stor usikkerhet knyttet til valg av diskonteringsrente for et anleggs fremtidig driftskostnad (Gollier & Weitzman, 2010). I følge rapporten «*Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*» skrevet av Lindholm et al. (2008) kan en diskonteringsrente på 3% gjøre et anlegg lønnsomt med nesten en dobling av investeringene i forhold til ved 7%.

Regnbedareal er den viktigste designparameteren ved dimensjonering av regnbed. Dette har direkte sammenheng med hvor stort areal og volum som er tilgjengelig for infiltrasjon og fordrøyning av overvann (Atchison et al., 2006; Hunt et al., 2011). Den hydrologiske ytelsen til et regnbed varierer avhengig av endringer i temperatur, forhold mellom regnbedareal og areal av område som bidrar med avrenning, samt type og tetthet av vegetasjon. Det er derfor nødvendig med pålitelig og brukervennlige tilnærminger for å vurdere hydrologisk ytelse til et regnbed (Shouhong & Yiping, 2013). En utfordring er mangel på langsiktige erfaringer med regnbed som klimatilpassningstiltak, og de langsiktige virkningene er uklart (Persson et al., 2018). Ifølge Persson et al. (2018) er økonomi og kunnskap om metoder for bygging og drift, gode planleggingsverktøy og dokumentasjon om temperatur og vann viktige kunnskapshull ved etablering av grønn infrastruktur. Med dette øker behovet for å utvikle fleksible overvannssystemer som kan reagere på endringer i inngangsverdiene som benyttes ved dimensjonering av overvannssystemet (Eckart et al., 2012).

Den betydelige usikkerheten i rasjonale formel, samt dimensjonering og kostnader for regnbed (Behrouz & Alimohammadi, 2018; Koumoura et al., 2018; Shouhong & Yiping, 2013) gir høy motivasjon for behovet om å benytte stokastiske simuleringsverktøy til å analysere usikkerhet. Klakegg (2003) definerer usikkerhetsanalyse som en systematisk fremgangsmåte for å identifisere, beskrive og beregne usikkerhet.

Monte Carlo simulering er en statistisk teknikk som brukes til å modellere og simulere usikkerhet med et stort antall tilfeldige verdier, basert på fordeling for relevante inngangsparametere (Macdonald & Strachan, 2001). Utvikling i maskinlæringsmetoder, teknikker og velutviklede simuleringsverktøy tilrettelegger mulighet for dette. Usikkerhetsanalysene i seg selv gir grunnlag for å vurdere om andre metoder enn de manuelle, kan benyttes som beslutningsgrunnlag ved dimensjonering og kostnadsberegning av regnbed.

1.1 Mål for oppgaven

Nåverdikostnaden for et regnbed er avhengig av svært mange parametere deriblant diskonteringsrente, kostnader ved etablering, drift og vedlikehold, overflateareal, nedbørfelt, dimensjonerende gjentakintervall, klimaframskrivninger etc. Det overordnede målet med denne oppgaven er å analysere og rangere disse bidragene til kostnadsusikkerhet ved etablering av regnbed i urbane områder. For å tilnærme seg målsettingen er følgende forskningsspørsmål definert:

1. Hvilke statistiske fordelinger kan tilknyttes inngangsparameterne ved dimensjonering og kostnadsberegning av regnbed?
2. Hvordan rangeres inngangsparameterens bidrag til usikkerhet ved dimensjonerende overvannsavrenning, regnbedareal og endelig nåverdikostnad for regnbed?
3. Hvordan er det mest formålstjenlig å både håndtere og redusere usikkerhet ved regnbed?

1.2 Struktur i oppgaven

Strukturen i oppgaven følger IMRAD format med unntak av at diskusjon og resultater er slått sammen til et kapittel. Oppgaven er tverrfaglig skrevet innen tema som overvannshåndtering, økonomi og usikkerhetsanalyse, der programmering benyttes som verktøy for å gjennomføre usikkerhetsanalysene. Først blir formler for usikkerhetsanalysene presentert, deretter gjennomgås Monte Carlo simuleringene og metoder for datainnsamling samt inngangsparameterne som inngår i usikkerhetsanalysene. Resultater fra usikkerhetsanalysene blir presentert med diskusjon og beskrivelse av resultatene. Masteroppgaven er skrevet med tanke på at leseren ikke behøver å ha forkunnskaper om overvannshåndtering, økonomi, usikkerhetsanalyser og programmering.

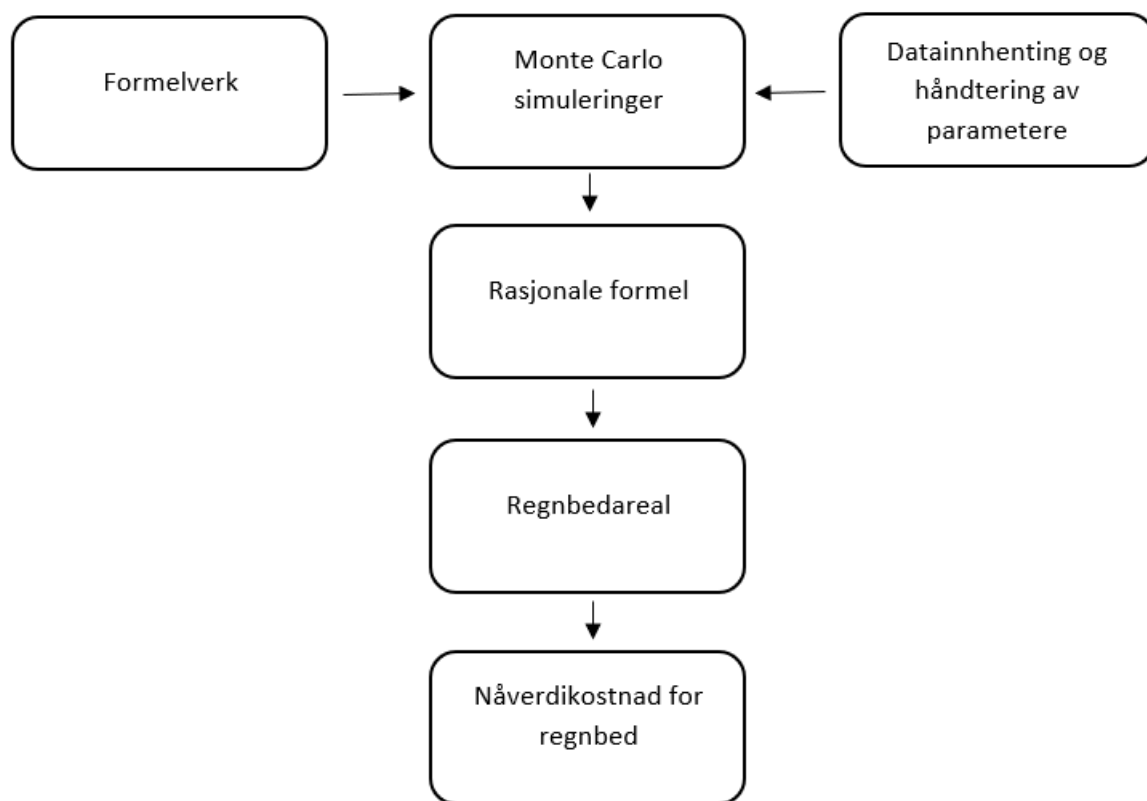
2 Metode

For å analysere og rangere parameterens bidrag til kostnadsusikkerhet ved etablering av regnbed i urbane områder, er det valgt å basere usikkerhetsanalysene på et regnbed som anlegges i et lite urbant nedbørsfelt (mindre enn 1 ha), som består av kun tette flater uten noen form for infiltrasjon eller betydelig gropmagasinering. Det er ikke tatt stilling til størrelse av nedbørsfelt og alle verdier er normalisert for nedbørsfeltareal.

I det videre er det redegjort for metode benyttet til å angripe og besvare forskningsspørsmålene. Dette inkluderer fremgangsmåte for datainnsamling, analysemetoder, databehandling og dataverktøy som er benyttet, samt valg og antakelser som er tatt. I dette kapitlet presenteres først ulike teoretiske formelverk for beregning av dimensjonerende overvannsavrenning, regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed (2.2). Deretter redegjøres det for statistiske tester og fordelinger av inngangsparameterne, så gjennomgås Monte Carlo simuleringene (2.3). Håndtering av inngangsparameterne blir presentert i kapittel 2.4.

2.1 Flytskjema

Figur 1 under viser et flytskjema som kort oppsummerer metode anvendt til å gjennomføre usikkerhetsanalysene.



Figur 1: Oppsummert beskrivelse av metodene og prosessen for å utføre usikkerhetsanalysene.

2.2 Formelverk

2.2.1 Den rasjonale formel

Ifølge Lindholm et al. (2008) anbefales det å ikke bruke den rasjonale formelen for nedbørsfelt større enn 0,2-0,5 km². Metoden er internasjonalt anerkjent og har i mange tiår blitt brukt til å designe hydrauliske infrastruktur (Young et al., 2009). For å ta hensyn til forventet nedbør i fremtiden som følge av klimaendringer, blir klimafaktoren (K_f) multiplisert med dagens dimensjonerende nedbør (IVF-statistikk) fra klimaservicesentret. Den rasjonale formelen normalisert for nedbørsfeltareal gir spesifikk dimensjonerende vannføring uttrykt som:

$$q_{dim} = I(t_r) \cdot \varphi(t_r) \cdot K_f \quad (1)$$

q_{dim}	Spesifikk dimensjonerende vannføring	[l/ha]
$\varphi(t_r)$	Avrenningskoeffisient til nedbørsfeltet	[-]
$I(t_r)$	Dimensjonerende nedbørintensitet for valgt varighet	[l/s·ha]
K_f	Klimafaktor	[-]

For å undersøke om rangeringen av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring endres for ulike varigheter, ble det valgt å utføre usikkerhetsanalyse av den rasjonale formelen for nedbør med varighet på 30, 60 og 120 min.

2.2.2 Overflateareal regnbed

Regnbed er et arealkrevende overvannsanlegg (Paus & Braskerud, 2013). Internasjonalt finnes det flere metoder for å dimensjonere regnbed. Eksempelvis har Hunt og White (2001) og NYSDEC (2022) utarbeidet forskjellige metoder til å dimensjonere regnbed i USA. I Norge har Paus og Braskerud (2013) kommet med en annen formel egnet for dimensjonering av regnbed i norsk klima. En enkelt betraktning ved formelen er; totalt vannvolum som skal håndteres tilsvarer 1) summen av vannvolumene som kan lagres på overflaten og 2) som kan rekke å infiltrere i løpet av nedbørhendelsen. Metoden baserer seg på valg av faste verdier for inngangsparameterne og antakelse om konstant nedbørintensitet gjennom hele nedbørhendelsen. Spesifikt regnbedareal (gitt i m²/ha) kan beregnes som:

$$f = \frac{\varphi \cdot P \cdot K_f}{h_{maks} + K_{sat} \cdot t_r} \quad (2)$$

f	Andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt	[-]
φ	Avrenningskoeffisient til nedbørsfeltet	[-]
P	Dimensjonerende nedbørmengde	[m]
h_{maks}	Maksimal vannstand på overflaten før vannet går i overløp	[m]
K_h	Mettet hydraulisk konduktivitet	[m/min]
t_r	Nedbørsvarigheten	[min]

Nødvendig areal på regnbed blir beregnet for et bestemt gjentaksintervall (T) med konstant nedbørintensitet (P) over en gitt varighet (t_r). Verdien valgt som h_{maks} er svært viktig for regnbedets hydrologiske kapasitet ved store nedbørmengder eller styrtregn, spesielt når regnbedets infiltrasjonskapasitet er begrenset. Ikke minst er det viktig å velge en passende verdi for hydraulisk konduktivitet (K_{sat}). Som et mål på infiltrasjonskapasitet i et regnbed er K_{sat} viktig inngangsparameter for regnbedets evne til å håndtere hyppige og langvarige nedbørhendelser.

Ved hjelp av formel (2) og regnvelopemetoden ble det gjennomført usikkerhetsanalyse av f -verdier for forskjellige varigheter fra IVF-statistikk.

2.2.3 Kostnader regnbed

For å analysere usikkerhet i nåverdikostnad av regnbed, blir den såkalte nåverdimetoden benyttet. Metoden diskonterer tiltakets fremtidige kostnader i løpet av en bestemt diskonteringsperiode til dagens verdi. Ergo benyttes det nåverdifaktoren R , definert som:

$$R = \frac{(1 + r)^n - 1}{r \cdot (1 + r)^n} \quad (3)$$

r	Diskonteringsrente	[-]
n	Diskonteringsperiode	[år]

Tiltakskostnad for regnbed (NOK/m²) over n år kan uttrykkes som:

$$K = K_e + K_{dr} \cdot R \quad (4)$$

$K_{per\ m^2}$	Nåverdikostnad per kvadratmeter regnbedareal	[NOK/m ²]
K_e	Enhetskostnad for etablering	[NOK/m ²]
K_{dr}	Årlig enhetskostnad for drift- og vedlikehold	[NOK/(m ² ·år)]

Den totale nåverdikostnaden for hele regnbedet (uttrykt som MNOK per nedbørfeltareal) blir følgende:

$$K_{regnbed} = f \cdot 10^2 \cdot (K_e + K_{dr} \cdot R) \quad (5)$$

$K_{regnbed}$	Total tiltakskostnad	[MNOK/ha]
f	Andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt	[-]

2.3 Usikkerhetsanalyse

2.3.1 Statistiske tester

For å gjennomføre usikkerhetsanalysene var det nødvendig med innsamling av data for inngangsparameterne i formel (1), (2), og (5), for så å bruke metoder som statistiske tester av datasettene, samt litteraturstudier til å sannsynliggjøre fordeling for inngangsparameterne. Hver inngangsparameter bidrar til usikkerhet som er nødvendig å avklare. Data for nedbørintensitet, nedbørvarighet og klimafaktoren er tilgjengelig på Norsk Klimaservicesenter. For de andre inngangsparameterne, ble ulike metoder benyttet for å fremskaffe representative datasett (kapittel 2.4). Fordelingskalkulatoren fra AgriMetSoft (2019) ble brukt til å utføre statistiske tester av dataene. Testene ble utført for ulike fordelinger og formålet var å finne ut hvilken fordeling dataene fulgte. Dette var viktig for å kunne bruke best tilpasset statistisk fordeling for hver inngangsparameter i videre gjennomføring av usikkerhetsanalysene.

2.3.2 Monte Carlo simuleringer

For å analysere usikkerhet i den rasjonale formelen, regnbedareal og kostnader for regnbed ble det gjennomført Monte Carlo simulering av formlene (1), (2) og (5) i programvaren R og ved hjelp av pakkene *stats*, *base*, *graphics* og *grDevices* (R Core Team, 2018). Det ble skrevet tre forskjellige R-koder. I hver usikkerhetsanalyse brukes 5- og 95-persentiler av resultatene. For å få stabile verdier for persentilene ble det brukt 1 000 000 simuleringer. De tre R-kodene er gjengitt i vedlegg A, B og C. Disse er skrevet for nedbør med gjentaksintervall på 2 år, der koden for den rasjonale formel er for 60 min varighet. I usikkerhetsanalyse av den rasjonale formelen for andre varigheter og gjentaksintervall, blir inputverdiene for nedbør, spissavrenningskoeffisient og evt. klimafaktor i koden (vedlegg A) justert. Når det gjelder analyse av usikkerhet i regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed ved andre gjentaksintervall, ble det kun gjort endringer i inputverdiene for nedbør og evt. klimafaktor (vedlegg B og vedlegg C).

Inngangsparameterne ble tilknyttet ulike fordelinger (se *Tabell 1*). Resultatene fra analysene viser sannsynligheten og verdien av alle mulige utfall basert på inputverdiene og fordelingene som er benyttet. I dette tilfelle er utfallene alle mulige verdier for vannføring per hektar nedbørsfelt ($l/s \cdot ha$) gitt av den rasjonale formelen, regnbedareal (m^2/ha) og nåverdikostnad for regnbed (MNOK/ha).

Tabell 1 viser en oppsummering av alle inngangsparameterne, valgt fordeling og inputverdier for fordelingene. Usikkerhetsanalysen ble utført for 2, 5, 10, 20, 25 og 50 år gjentaksintervall ved 30, 60 og 120 min varighet.

Tabell 1: Fordeling og verdier av inngangsparameterne brukt til å gjennomføre Monte Carlo simuleringene.

Inngangsparameter	Fordeling	Inputverdier
<u>Rasjonale formel</u>		
Nedbør	GEV fordeling	Verdier av form-, lokasjons- og skalaparameter for 2,5-, 50- og 97,5-persentiler av nedbør for varighet på 30, 60 og 120 min. Verdiene tilsvarer regnhendelser med gjentakintervall på 2, 5, 10 og 20 år.
Avrenningskoeffisient (ϕ)	Trekantfordeling	Verdier ved varighet på 30 min: Minimum: 0,4 Maksimum: 1,2 Median: 0,8 Verdier ved varighet på 60 min: Minimum: 0,7 Maksimum: 1,2 Median: 0,9 Verdier ved varighet på 120 min: Minimum: 0,8 Maksimum: 1,2 Median: 0,9
Klimafaktor (K_f)	Uniformfordeling	Minimum: 1,2 Maksimum: 1,4 Median: 1,3
<u>Dimensjonering av regnbed</u>		
Nedbør	GEV fordeling	Verdier av form-, lokasjons- og skalaparameter for 2,5-, 50- og 97,5-persentiler av nedbør for alle varigheter. Verdiene tilsvarer regnhendelser med gjentakintervall på 2, 5, 10 og 20 år.
Avrenningskoeffisient (ϕ)	Trekantfordeling	Minimum og maksimum verdier av avrenningsdata for ulike varigheter. Median: 0,9
Klimafaktor (K_f)	Uniformfordeling	Minimum: 1,2 Maksimum: 1,4 Median: 1,3

Hydraulisk konduktivitet (K_{sat})	Lognormalfordeling	Median: 34,3889 cm/t Standardavvik: 1,0449 cm/t Minimum: 1,7 cm/t Maksimum: 246 cm/t
Maksimal vannstand (h_{maks})		Minimum: 6,5 cm Maksimum: 35 cm
Nedbørvarighet (t_r)		Bruker alle varigheter
<u>Kostnader</u>		
Investeringskostnad (K_e)	Lognormalfordeling	Median: 4 252,829 NOK/m ² Standardavvik: 0,8626 NOK/m ² Minimum: 950 NOK/m ²
Driftskostnader (K_{dr})	Gammafordeling	Median: 202,2 NOK/m ² Standardavvik: 104,7 NOK/m ² Alfa: 3,73 Beta: 0,0184 NOK ⁻¹ /m ⁻²
Diskonteringsrente (r)	Gammafordeling	Median: 4 % Standardavvik: 3 % Alfa: 1,778 Beta: 0,444 % ⁻¹
<u>Konstanter</u>		
Diskonteringsperiode		40 år

Hver usikkerhetsanalyse ble gjennomført like mange ganger som antall inngangsparametere. For hver gang ble en av inngangsparametere antatt som en fast verdi. Den faste verdien ble valgt som median av dataene for inngangsparameteren. Dette vil være en tilnærming for hvor mye usikkerheten blir redusert dersom inngangsparameteren er kjent. *Tabell 2* nedenfor oppsummerer de faste verdiene.

Tabell 2: Faste verdier av inngangsparameterne brukt til å finne inngangsparameterens bidrag til usikkerhet ved spesifikk dimensjonerende vannføring, regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed.

<u>Inngangsparameter</u>	<u>Inputverdi</u>
<u>Rasjonale formel</u>	
Nedbørintensitet (I)	50-persentilen av IVF-statistikk fra Klimaservicesentret for varighet på 30, 60 og 120 min og for hver gjentakintervall.
Avrenningskoeffisient (φ):	Median ved 30 min varighet: 0,8 Median ved 60 min varighet: 0,9 Median ved 120 min varighet: 0,9
Klimafaktor (K_f)	Gjentaksintervall på 2, 5, 10, 20, 25 år: 1,3 Gjentaksintervall på 50 år: 1,4
<u>Regnbedareal</u>	
Nedbør (P)	50% persentil av IVF-statistikk fra Klimaservicesentret for alle varigheter og for hver gjentakintervall.
Klimafaktor (K_f)	Gjentaksintervall på 2, 5, 10, 20, 25 år: 1,3 Gjentaksintervall på 50 år: 1,4
Hydraulisk konduktivitet (K_{sat})	20,2 cm/t
Maksimal vannstand (h_{maks})	20 cm
<u>Kostnader</u>	
Investeringskostnad (K_e)	2 568 NOK/m ²
Driftskostnad (K_{dr})	165 NOK/m ²
Diskonteringsrente (r)	4 %

2.3.3 Oppsett for Monte Carlo i R

Som nevnt under forrige delkapittel, ble det laget tre forskjellige R-koder som utfører Monte Carlo simulering av spesifikk dimensjonerende vannføring, regnbedareal og kostnader for regnbed. Under beskrives hvordan hver kode er satt opp:

Den rasjonale formel

1. Inputverdier for de statistiske fordelingene for alle inngangsparameterne i formel (1) (nedbørintensitet, avrenningskoeffisient og klimafaktor) blir definert.
2. De definerte inputverdiene blir brukt til å generere 1 000 000 tilfeldige verdier for hver inngangsparameter ved hjelp av de valgte fordelingene.
3. Formel (1) anvendes på de genererte verdiene. Dette gir 1 000 000 tilfeldige verdier for spesifikk dimensjonerende vannføring.

Regnbedareal

1. Inputverdier for de statistiske fordelingene for alle inngangsparameterne i formel (2) (nedbørintensitet, avrenningskoeffisient, klimafaktor, mettet hydraulisk konduktivitet, maksimal vannstand) blir definert.
2. For hver inngangsparameter blir det laget en matrise med 1 000 000 rader og 12 kolonner. Matrisene blir opprettet for å lagre verdiene som blir simulert i neste steg. Antall rader i matrisene tilsvarer antall simuleringer, mens antall kolonner tilsvarer antall varigheter regnbedet skal dimensjoneres for.
3. Det opprettes en forløkke med 12 simuleringer. For hver gang forløkken kjøres genereres det 1 000 000 nye tilfeldige verdier for hver inngangsparameter, basert på definerte inputverdiene og valgt fordeling.
4. Formel (2) blir anvendt på de tilfeldige verdiene for inngangsparameterne som ble lagret i matriser. Dette gir en ny matrise for *andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt* (f). Største verdi av hver rad i denne matrisen trekkes ut, som til sammen utgjør 1 000 000 tilfeldige maksimalverdier for f .

Kostnader

Denne R-koden er en fortsettelse av den som ble laget for f .

1. Inputverdier for de statistiske fordelingene av alle inngangsparameterne i formel (4) (etableringskostnad, driftskostnad og diskonteringsrente) blir definert.
2. De definerte inputverdiene blir brukt til å generere 1 000 000 tilfeldige verdier for hver inngangsparameter ved hjelp av de valgte fordelingene.
3. Deretter anvendes formel (5) på alle genererte verdier av inngangsparameterne i formel (4) og maksimalverdiene for f (resultat av forrige R-kode). Dette gir 1 000 000 verdier for nåverdikostnad for regnbed basert på de valgte fordelingene i formel (2) og formel (5).

2.4 Inngangsparametere

2.4.1 Avrenningskoeffisient (φ)

Avrenningskoeffisient er sjelden uniform og konstant over et nedbørsfelt. Den vil variere avhengig av hvor vannmettet grunnen er (Stenius et al., 2015). Spissavrenningskoeffisient ble beregnet ved hjelp av formel (6) og innsamlet data på nedbør (P) og avrenning (q) fra et svart tak på 8 m² (Bent Braskerud). Måledataene var fra de 50 største nedbørhendelsene i løpet av ca. 4 års måleperiode (2009-2014), og for varigheter fra 5 til 1440 min med unntak av 15 min. Dvs. det er totalt 12 datasett for avrenningskoeffisient med forskjellige varigheter. Det blir antatt at avrenningskoeffisient er trekantfordelt for alle varigheter. Min- og maksimumsverdi av dataene for inngangsparameteren for de ulike varighetene ligger et sted mellom 0 og 1,8. Disse verdiene er vist i vedlegg D og ble brukt som input for trekantfordeling av avrenningskoeffisient under usikkerhetsanalysene.

Det er verdt å påpeke at verdier for avrenningskoeffisient som er over 1, kan skyldes usikkerhet i måledataene for nedbør og/eller avrenning, eller avrenning som følge av snøsmelting. I

usikkerhetsanalyse av den rasjonale formelen, ble min- og maksimumsverdier til datasettene med varighet på 30, 60 og 120 min benyttet. Ved usikkerhetsanalyse av regnbedareal derimot, ble min- og maksimumsverdi av alle de 12 datasettene benyttet.

$$\varphi_{Spiss} = \frac{q}{p} \quad (6)$$

φ_{Spiss}	Spissavrenningskoeffisient	[-]
q	Avrenning	[mm]
p	Nedbør	[mm]

2.4.2 Nedbør (P)

Klimaservicesentret (2023) gir ut nedbørstatistikk for Blinderen Plu (SN18701) med tre persentiler (2,5%, 50% og 97,5%). I Dyrddal et al. (2022) fremkommer det at nedbørstatistikk fra Blindern Plu er tilpasset GEV-fordeling (Generalized extreme value) basert på tre estimerte parametere. GEV-fordeling uttrykker den kumulative tetthetsfunksjonen som følgende:

$$P(x) = e^{\left(-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right)} \quad \text{for} \quad \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) > -1 \quad (7)$$

$P(x)$	Sannsynlighet for at nedbørmengde x oppstår gitt den kumulative fordelingsfunksjonen	[-]
x	Nedbørmengde	[mm]
ξ	Formparameter (shape)	[-]
μ	Lokasjonsparameter (location)	[-]
σ	Skalaparameter (Scale)	[-]

Parameterne μ , σ og ξ ble bestemt ved å tilpasse likning (7) til nedbørmengdene for de tre persentilene for nedbørstatistikk som kommer frem på Klimaservicesentret. Tilpasningen ble utført ved hjelp av ikke lineær GRG (Generalized Reduced Gradient) i Excel for nedbør med gjentaksintervall på 2, 5, 10, 20, 25 og 50 år. I praksis er valg av dimensjonerende gjentaksintervall i veldig stor grad avhengig av de lokale forholdene i område (Lindholm, 2015). I denne studien ble usikkerhetsanalysene utført for flere ulike gjentaksintervall for å undersøke hvordan usikkerheten tilknyttet nedbør utvikler seg. Nedbørstatistikk for Blinderen Plu er gjengitt i vedlegg E.

Den kumulative tetthetsfunksjonen i formel (8), ble løst for nedbørmengde x , og brukt som fordeling av nedbør i usikkerhetsanalysen.

$$x = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \cdot \left(\frac{1}{-\ln(P(x))^\xi} - 1 \right) \quad (8)$$

Siden måleverdiene for avrenningskoeffisient starter fra varighet på 5 til 1440 min med unntak av 5 min varighet, ble usikkerhetsanalysen for regnbedareal også utført for de tilsvarende varighetene.

2.4.3 Varighet (t_r)

Som nevnt under delkapittel 2.2.1, usikkerhetsanalysen av den rasjonale formelen for hvert gjentaksintervall ble utført for varigheter på 30, 60 og 120 min. Videre, for å utføre usikkerhetsanalyse av regnbedareal ble formel (2) for dimensjonering av regnbed, brukt sammen med regnvelopmetoden for varigheter (t_r) fra 5 til 1440 min med unntak av 5 min varighet. Varigheten som gir maksimalt verdi for f er den dimensjonsgivende varigheten for regnbed.

2.4.4 Klimafaktor (K_f)

I følge Dyrddal og Førland (2019) anbefales det ulike verdier for klimafaktor for korttidsnedbør ved dimensjonering for ulike gjentaksintervaller. For et gjentaksintervall mindre enn 50 år kan klimafaktoren variere fra 1,2 til 1,4 helt avhengig av om det er et tørt eller et nedbørrikt område, og hva varigheten er. Forutsatt min- og maks-verdier på 1,2 og 1,4 ble klimafaktoren antatt til å være enten uniform eller trekantfordelt. I denne studien ble tidsavhengighet av klimafaktoren ikke hensyntatt.

2.4.5 Hydraulisk konduktivitet (K_{sat})

Hydraulisk konduktivitet (K_{sat}) i et regnbed er svært viktig for vannhastighet gjennom anlegget og inn i grunnvannet (Atchison et al., 2006). Variasjon i hydraulisk konduktivitet mellom forskjellig porøse materialer og jordtyper, innen samme jordmateriale på grunn av ulik partikkelstørrelse og tetthet, og på forskjellige dybder har stor betydning for regnbedets funksjonalitet over tid (Atchison et al., 2006; Lunde, 2020). Studien til Lunde (2020) kommer med et representativt datasett med varierende verdier for hydraulisk konduktivitet målt og undersøkt i 34 ulike regnbed. Et av regnbedene med median av K_{sat} på 0 ble fjernet. De gjenværende 33 verdiene ble benyttet som datasett for K_{sat} . Disse er gjengitt i vedlegg F Basert på tidligere studier (Cristiano et al., 2017; Lunde, 2020), samt de statistiske fordelingstestene ble det antatt at K_{sat} følger lognormalfordeling med median og standardavvik på 34,389 cm/t og 1,045 cm/t. Disse verdiene ble gitt av den statistiske fordelingstesten av datasettet. Den logtransformerte verdien av median sammen med standardavviket, ble brukt som inputverdier for usikkerhetsanalysene.

2.4.6 Maksimal vannstand (h_{maks})

Studien til Lunde (2020) undersøker også h_{maks} -verdi for 24 av regnbedene. For regnbedet med hydraulisk konduktivitet (K_{sat}) på 0 cm/t ble h_{maks} -verdien fjernet. De gjenværende 23 h_{maks} -verdiene ble brukt som datasett for inngangsparameteren, der den minste og største verdi er henholdsvis 6,5 cm og 35 cm. Det er flest verdier på 10 cm, 20 cm og 25 cm (18 av 23). Dataene for h_{maks} er også gjengitt i vedlegg F. Det blir antatt at h_{maks} følger trekantfordeling med min- og maksimumsverdi på 6,5 cm og 35 cm. Disse verdiene ble brukt som input for fordeling av h_{maks} under usikkerhetsanalysene.

2.4.7 Etableringskostnad (K_e)

For å finne data og fordeling for enhetskostnad for etablering av regnbed (K_e), ble det i første omgang undersøkt hvor i Oslo det er anlagt regnbed for deretter å undersøke hvor mye de enkelte regnbedene har kostet i etablering og drift. For 25 anlagte regnbed i Oslo ble dokumenter fra planinnsyn undersøkt. En liste over disse er gjengitt i vedlegg G. Dokumentene hadde informasjon om hvem som har vært tiltakshaver av det enkelte prosjektet. Tiltakshaver for hver regnbed ble kontaktet for å få tilgang på K_e . Dataene for enhetskostnad ved etablering av regnbed presentert av Paus og Egeberg (2020) ble også benyttet. Disse ble prisjustert for januar 2023 basert på statistisk seltralbyrås kalkulator for KPI (Konsumprisindeks).

Dataene for enhetskostnad til etablering av regnbed er gjengitt i vedlegg H.

Smart (2023) hevder at usikkerhet i kostnader er lognormalfordelt. I tillegg til dette viste de statistiske testene at variasjonen i datasettet passer best med lognormalfordeling. Siden ble det antatt at enhetskostnader for etablering av regnbed er lognormalfordelt med median og standardavvik på 4 252,83 NOK/m² og 0,8626 NOK/m² gitt av den statistiske testen. Ved gjennomføring av usikkerhetsanalysen for kostnader, ble den logtransformerte av median sammen med standardavvik, brukt som input for analysen.

2.4.8 Driftskostnad (K_{dr})

For å samle opp data for enhetskostnad for drift av regnbed ble det som nevnt under 2.4.7 tatt kontakt med tiltakshavere av 25 anlagte regnbed i Oslo, samt Norges Grønne Fagskole – Vea. Fagskolen tilbyr utdanning for blant annet gartnere og anleggsgartnere. Det ble undersøkt hvilke anleggsgartnerfirmaer som har erfaring med drift og vedlikehold av grønt utenomhusanlegg. Disse ble kontaktet for å hente inn estimater for enhetskostnad ved drift av regnbed (K_{dr}) i Oslo. De representative dataene for inngangsparameteren er gjengitt i vedlegg I. Statistiske testene viste at variasjonen i dataene er best tilpasset gammafordeling med median og standardavvik på 202,2 NOK/m²·år og 104,7 NOK/m²·år.

2.4.9 Diskonteringsrente (r)

I NOU2012:16 (2012) anbefales en risikojustert diskonteringsrente på 4% ved en diskonteringsperiode på 40 år som starter fra analysetidspunktet. Dessuten er det skrevet en artikkel av Weitzman (2001) som presenterer resultater av en undersøkelse basert på meninger om valgt verdi for diskonteringsrente fra 2160 økonomer. De faste verdiene for diskonteringsrente hver økonom har kommet med, utgjør et datasett med 2 160 verdier. Ifølge artikkelen er variasjonen i verdiene gammafordelt, med median (μ) på 4% og standardavvik (σ) på 3%. Det ble derfor antatt at diskonteringsrenten er gammafordelt. Formel (9) og formel (10) for median og standardavvik på 4% og 3% ble benyttet til å beregne alfa (α) og beta (β). I usikkerhetsanalysen for kostnader ble α og β brukt som input for gammafordeling av diskonteringsrenten.

$$\alpha_r = \frac{\mu_r^2}{\sigma_r^2} \quad (9)$$

$$\beta_r = \frac{\mu_r}{\sigma_r^2}$$

α_r	Alfa for gammafordeling av diskonteringsrente	[-]
β_r	Beta for gammafordeling av diskonteringsrente	[% ⁻¹]
μ_r	Median til diskonteringsrente	[%]
σ_r	Standardavvik til diskonteringsrente	[%]

2.4.10 Diskonteringsperiode (n)

Diskonteringsperiode til regnbed ble antatt til å være 40 år fra analysetidspunktet. Ved gjennomføring av usikkerhetsanalysen for kostnader ble diskonteringsperioden brukt som en inngangsparameter med fast verdi på 40 år.

2.5 ChatGPT

I denne oppgaven ble ChatGPT i noen grad brukt som et verktøy for å bistå med tekstformulering, og til å skrive R-kodene for Monte Carlo simulering som ble videre bearbeidet.

3 Resultater og diskusjon

I dette kapitlet presenteres variasjonen tilknyttet hver inngangsparameter basert på valgt fordeling(3.1), så presenter usikkerhet i den rasjonale formelen, regnbedareal og kostnader for regnbed, samt en gjennomgang om rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i hver usikkerhetsanalyse (3.2). Deretter vurderes de oppnådde resultatene (3.3), og til sist konkluderes det med hvordan den analyserte usikkerheten kan bli redusert.

3.1 Sannsynlighetsfordeling av parametere

Tabell 3 oppsummerer resultater av statistiske tester, uttrykt som P-verdi. P-verdi er en statistisk verdi som beregnes basert på dataene for parameteren, og den indikerer sannsynlighet for å oppnå den observerte forskjellen (eller større), gitt at nullhypotesen er sann (Pripp, 2015). I denne oppgaven er nullhypotesene at dataene for inngangsparameterne har de fordelingene som vist i *Tabell 3*.

Tabell 3: P-verdi som resultat av de statistiske testene for K_{sat} , K_e og K_{dr} brukt til å finne fordelingen som tilknyttes disse parametere.

Inngangsparameter	Fordeling	P-verdi
<u>Dimensjonering av regnbed</u>		
Hydraulisk konduktivitet (K_{sat})	lognormalfordeling	0,70
<u>Kostnader</u>		
Etableringskostnad (K_e)	Lognormalfordeling	0,982
Driftskostnad (K_{dr})	Gammafordeling	0,94

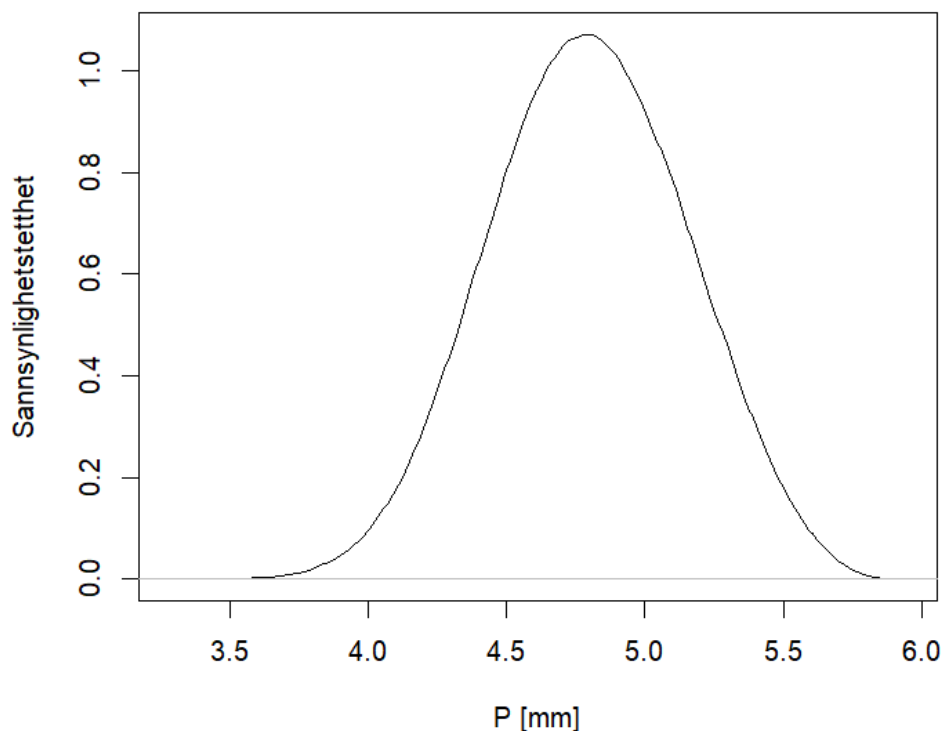
P-verdien alene ikke er tilstrekkelig for valg av fordeling (Lysne & Olsen, 2016). Som det innledningsvis ble nevnt i delkapittel 2.4.1, ble fordelingen av inngangsparameterne i denne oppgaven derfor valgt basert på både litteraturstudier og statistiske tester av dataene. I det videre er de statistiske fordelingene knyttet til hver inngangsparameter presentert.

3.1.1 Hydrologisk størrelser

Nedbør (P)

Blinderen Plu er en av stasjonene som har lengst tidsserie for kontinuerlige målinger av nedbør. Som en følge av dette kan IVF-statistikken fra denne stasjonen anses å være svært pålitelig, sammenlignet med IVF-statistikk fra andre stasjoner i Norge. Bruk av IVF-statistikk fra andre stasjoner med kortere tidsserier av målinger, kan gi en større grad av usikkerhet når det gjelder nedbør sammenlignet med funnene i denne studien. Når statistikken er basert på færre datapunkter, kan estimatene av sannsynlighet for ulike mengder nedbør være mindre nøyaktig.

Figure 2 under viser GEV-fordeling for nedbør med gjentaksintervall 2 år og varighet 60 min.



Figur 2: GEV-fordeling av nedbør for 2 år gjentaksintervall og 5 min varighet, utført for en million Monte Carlo simuleringer.

Klimafaktor (K_f)

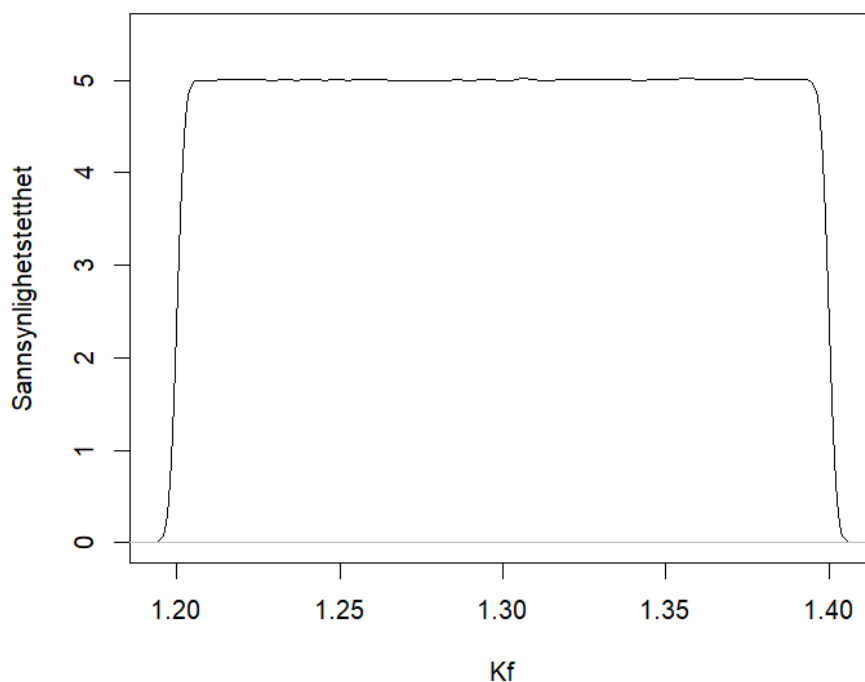
I henholdt til resultatene fra denne studien er det ikke vesentlig forskjell mellom variasjon i trekantfordeling av K_f og uniformfordeling av K_f (se Tabell 4). Årsaken til dette kan være at begge fordelingene er basert på minimum- og maksimumsverdi for inngangsparameteren (henholdsvis 1,2 og 1,4), og når forskjellen mellom disse verdiene er så liten, vil de tilfeldige K_f -verdiene ved begge fordelingene begrenses til et lite utvalg av mulige verdier.

Tabell 4: Resultat av Monte Carlo simuleringene for uniform- og trekantfordeling av klimafaktoren (K_f) som ble basert på verdiene fra Tabell 1.

Resultat av usikkerhetsanalyse for fordeling av K_f	P5 [l/s·ha]	P95 [l/s·ha]
Uniform fordeling	1,21	1,39
Trekantfordeling	1,23	1,36

Det er derfor lite praktisk forskjell mellom å bruke en trekantfordeling eller uniformfordeling av klimafaktor. For å ha variasjon i fordelinger tilknyttet inngangsparameterne, ble det i denne oppgaven valgt å vurdere resultatene som er basert på uniformfordeling av K_f .

Figur 3 under viser uniformfordeling av K_f for min- og maksimumsverdi på 1,2 og 1,4.



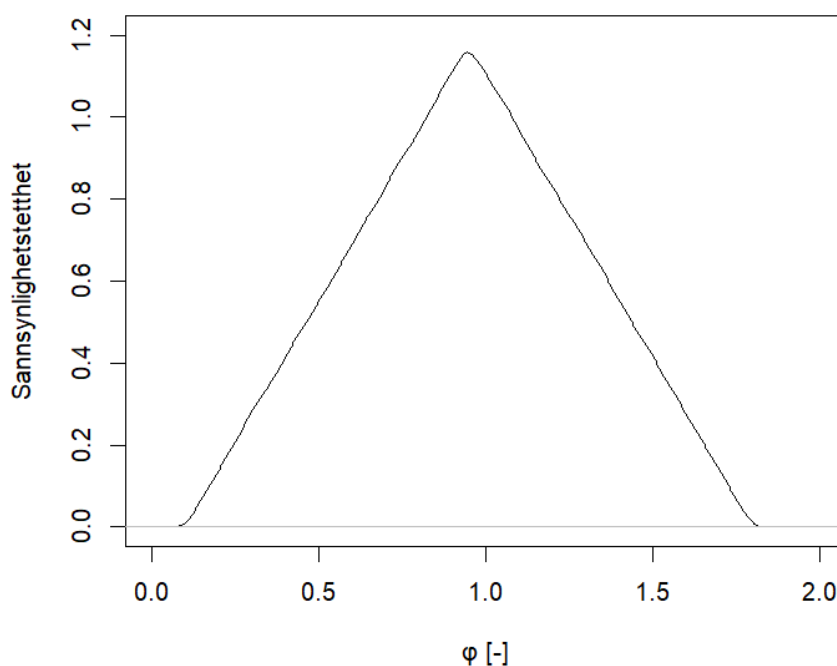
Figur 3: Uniformfordeling av klimafaktor for en million Monte Carlo simuleringer.

3.1.2 Feltkarakteristikk

Avrenningskoeffisient (φ)

Ved en trekantfordeling vil minimum- og maksimumsverdiene aldri bli overskredet, og de tilfeldige verdiene vil ligge et sted mellom disse. Variasjonen ved trekantfordeling av avrenningskoeffisient avtar når varigheten på observasjonene øker (unntatt 1440 min varighet). Dette skyldes at forskjellen mellom den minste og den største verdien som er brukt, er størst ved 5 min varighet og blir mindre for økende varigheter.

Figur 4 nedenfor viser trekantfordeling av avrenningskoeffisient ved 5 min varighet.



Figur 4: Trekantfordeling av avrenningskoeffisient for 5 min varighet ved en million Monte Carlo simuleringer.

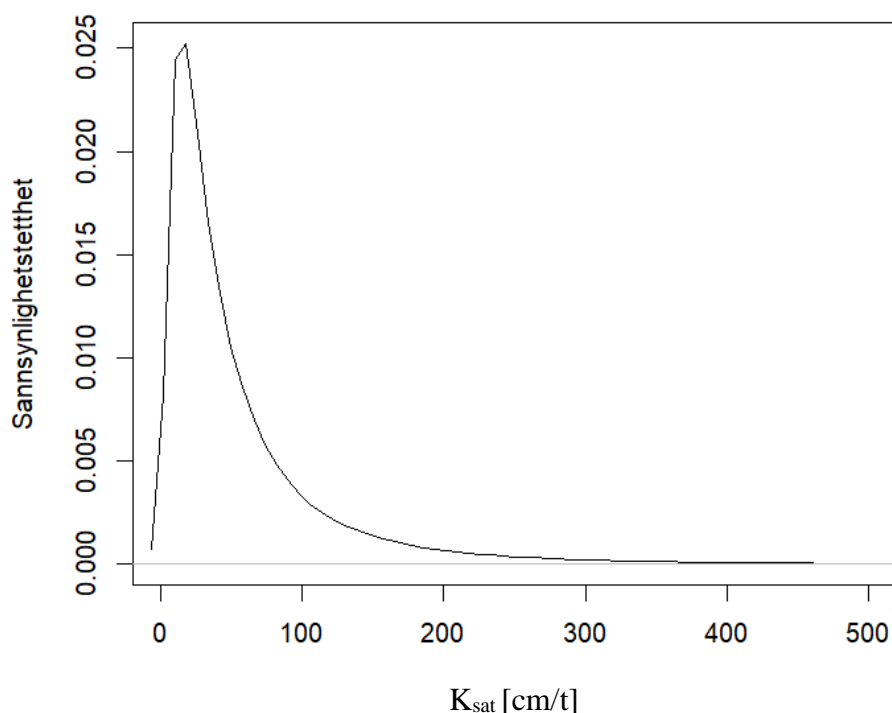
3.1.3 Tiltakskarakteristikk

Hydraulisk konduktivitet (K_{sat})

Lognormalfordeling tilknyttet hydraulisk konduktivitet er skjevfordelt, og beskriver sannsynligheter for K_{sat} -verdier større enn null. Som forventet er variasjonen i K_{sat} stor (Atchison et al., 2006; Lunde, 2020). Verdien av K_{sat} som et mål på infiltrasjonsevne i regnbed, kan være svært vanskelig å bestemme. Den kan variere i tid og rom, avhengig av lokale forhold som grunnvannsnivå, sesongmessige (temperatur) endringer, jordfuktighet, jordstruktur, komprimering, porevolum, innstrømningsedimenter og type beplantning (Atchison et al., 2006; Ebrahimian et al., 2019).

Innstrømningsedimenter reduserer infiltrasjonsevnen i et regnbed ved å fylle opp porene i jorda og redusere tilgjengelig plass for vann. Økt komprimering reduserer makroporer og porevolum i jorda. Dette fører til reduksjon i permeabilitet og mindre infiltrasjon av overvannsavrenning. Jord kan bli komprimert som følge av kjøretøy- og fottrafikk, konstruksjon eller andre stedsaktiviteter som kan forårsake jordforstyrrelser (Ebrahimian et al., 2019). Høyt grunnvannsnivå og lav temperatur kan også påvirke den hydrauliske konduktiviteten negativt. I vintertid ved frost og tele i bakken, kan porene i jorda også kunne fryse, noe som kan føre til at vannet ikke trenger gjennom jorda så lett som før. Fryse-tine-prosesser av jorda og lange tørre perioder kan øke infiltrasjon ved å skape flere makroporer og strømningsveier, samtidig som at vannets høye viskositet ved lave temperatur reduserer strømningshastigheten gjennom porene i jorda (Ebrahimian et al., 2019).

Figur 5 under viser lognormalfordeling av hydraulisk konduktivitet for en million Monte Carlo simuleringer.

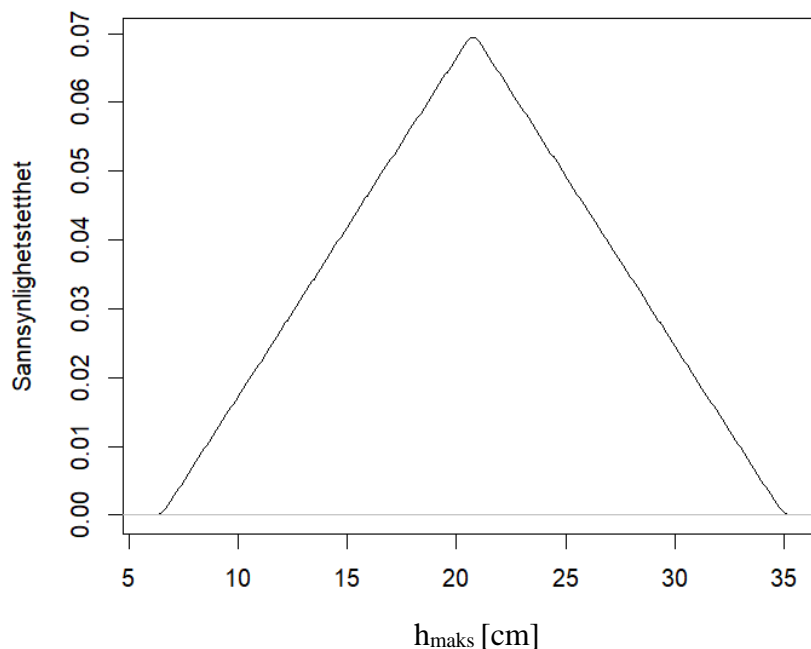


Figur 5: Lognormalfordeling av hydraulisk konduktivitet for en million Monte Carlo simuleringer.

Maksimal vannstand (h_{maks})

I denne studien ble det funnet stor usikkerhet knyttet til maksimal vannstand basert på trekantfordeling av dataene. Dette kan skyldes at det er stor forskjell mellom minste (6,5 cm) og største (35 cm) verdi i datasettet, noe som gjør det vanskelig å estimere trekantfordelt maksimalvannstand med liten variasjon.

Figur 6 under viser trekantfordeling av denne parameteren.

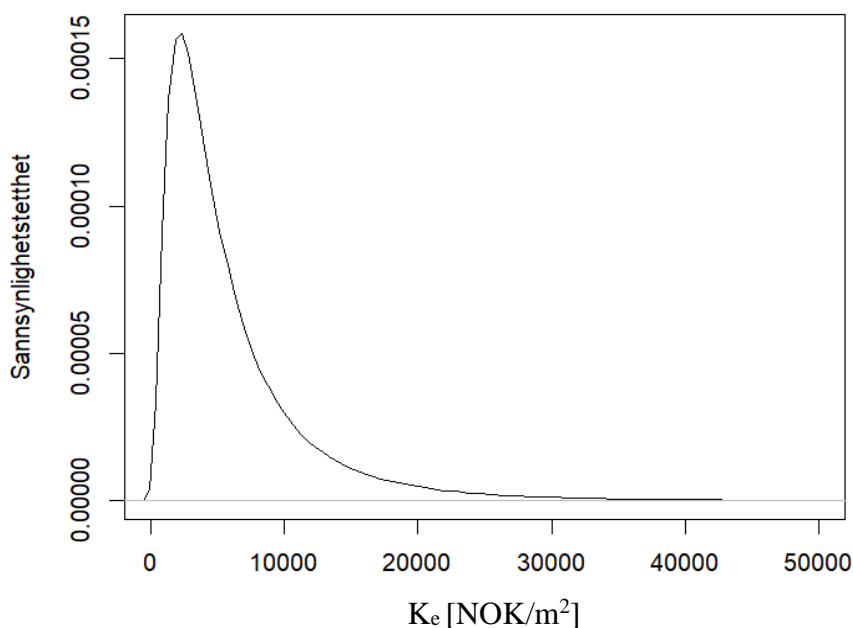


Figur 6: Trekantfordeling for maksimal vannstand for en million Monte Carlo simuleringer.

3.1.4 Kostnader

Etableringskostnad (K_e)

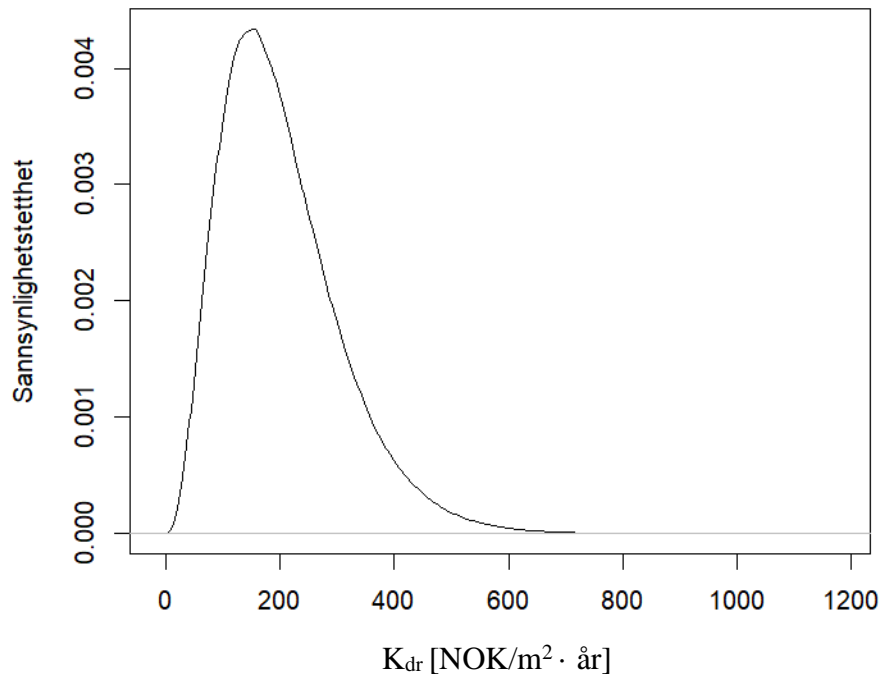
Figur 7 viser lognormalfordeling av enhetskostnad for etablering av regnbed (K_e). Akkurat som K_{sat} , har denne inngangsparameteren også en positiv nedre grense og er tilknyttet stor variasjon. Dataene som ble innhentet for å sannsynliggjøre fordelingen av K_e , er faktiske verdier fra allerede etablerte regnbed.



Figur 7: Lognormalfordeling av enhetskostnad for etablering av regnbed for en million Monte Carlo simuleringer.

Driftskostnad (K_{dr})

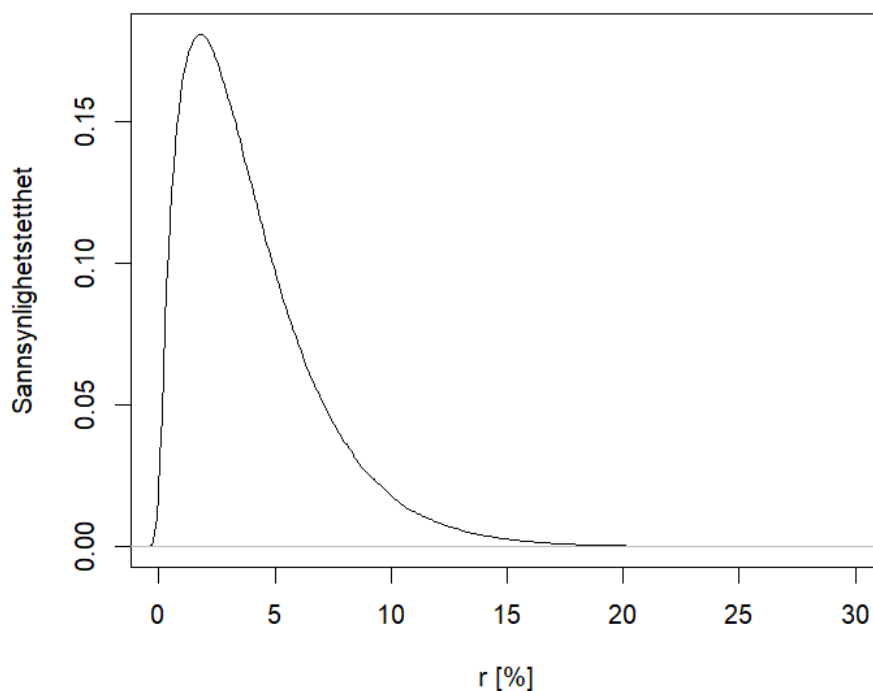
Gammefordeling av enhetskostnad for drift av regnbed (K_{dr}) viser stor variasjon i inngangsparameteren. Dette er vist i *Figur 8* under.



Figur 8: Gammefordeling av enhetskostnad for drift av regnbed for en million Monte Carlo simuleringer.

Diskonteringsrente (r)

Som forventet ble det funnet stor usikkerhet knyttet til diskonteringsrente (Gollier & Weitzman, 2010; Weitzman, 2001). *Figur 9* under viser dette ved hjelp av gammelfordeling av inngangsparameteren.



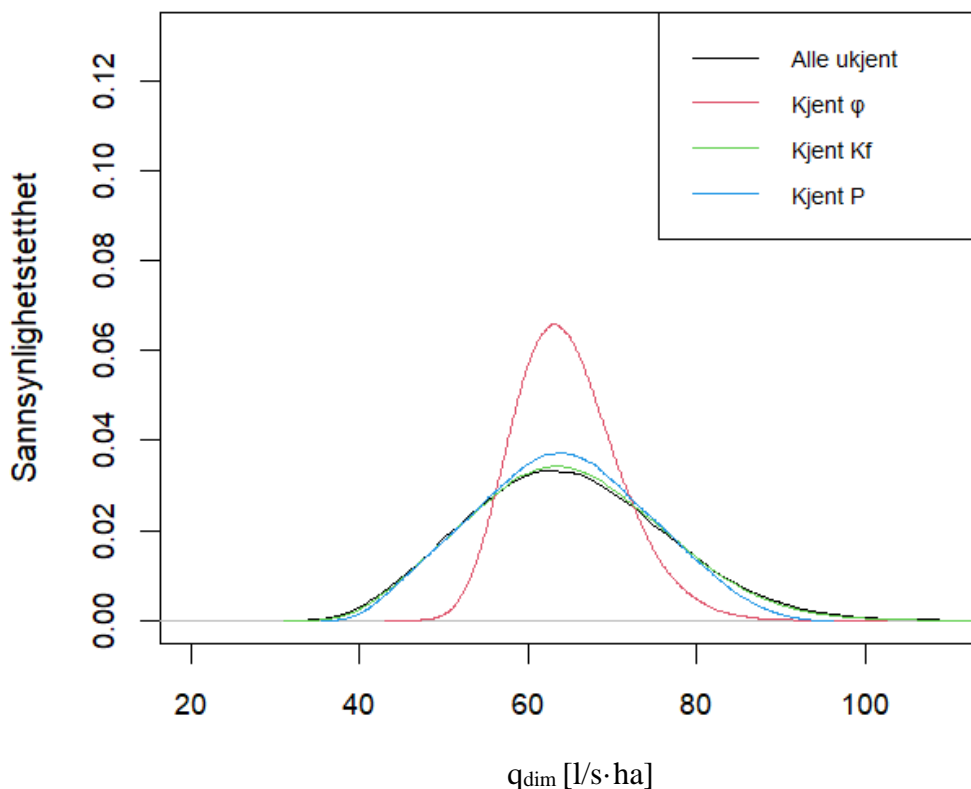
Figur 9: Gammelfordeling av diskonteringsrente for en million Monte Carlo simuleringer.

3.2 Kvantifisering av usikkerhet

3.2.1 Dimensjonerende overvannsvolum

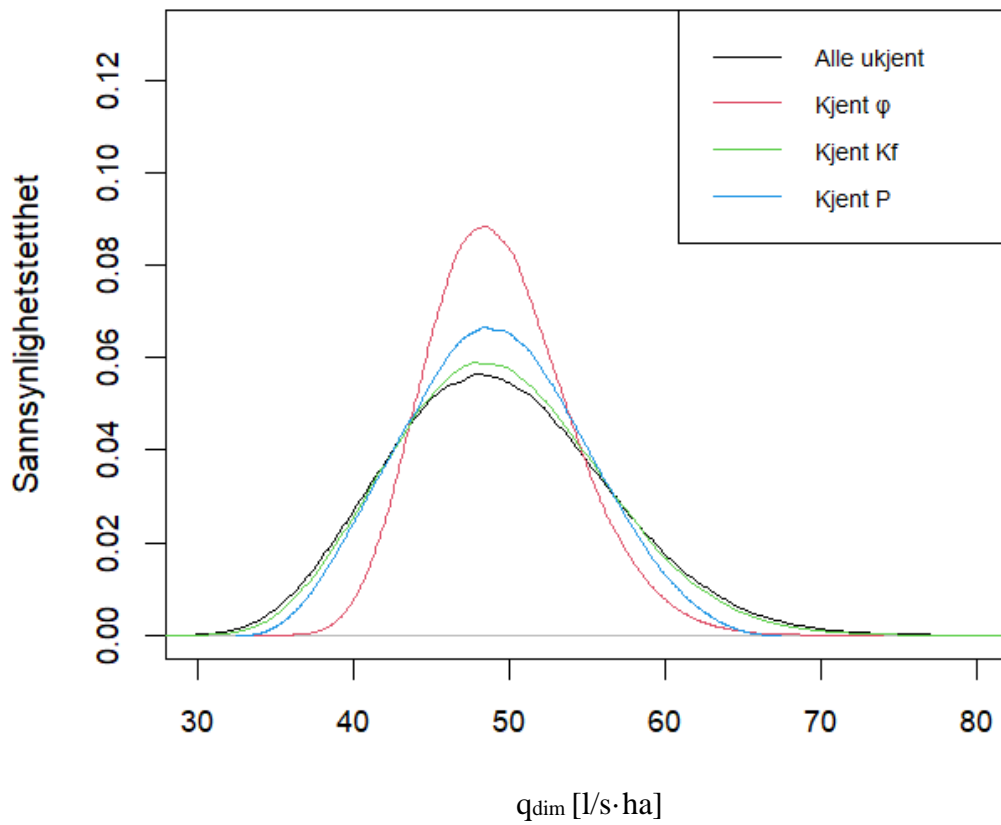
Figur 10, Figur 11 og Figur 12¹ under viser variasjon av q_{dim} for en million Monte Carlo simuleringer av den rasjonale formelen ved gjentakintervall på 2 år og varighet på 30, 60 og 120 min. Slik det var forventet, når varigheten øker blir variasjonen i spesifikk dimensjonerende vannføring (q_{dim}) mindre. Dette kan skyldes at usikkerhet i avrenningskoeffisient og nedbørintensitet avtar for økende varighet. IVF-statistikk fra Klimaservicesentret viser at forskjellen mellom 2,5- og 97,5-persentil av nedbørintensitet reduseres når varigheten øker.

Jo lenger varigheten er, desto mer likt blir usikkerhetsbidraget tilknyttet avrenningskoeffisient og nedbørintensitet. Klimafaktoren derimot ble brukt som tidsuavhengig inngangsparameter i Monte Carlo simuleringene, og har sannsynligvis hatt samme grad av variasjon for alle varigheter.

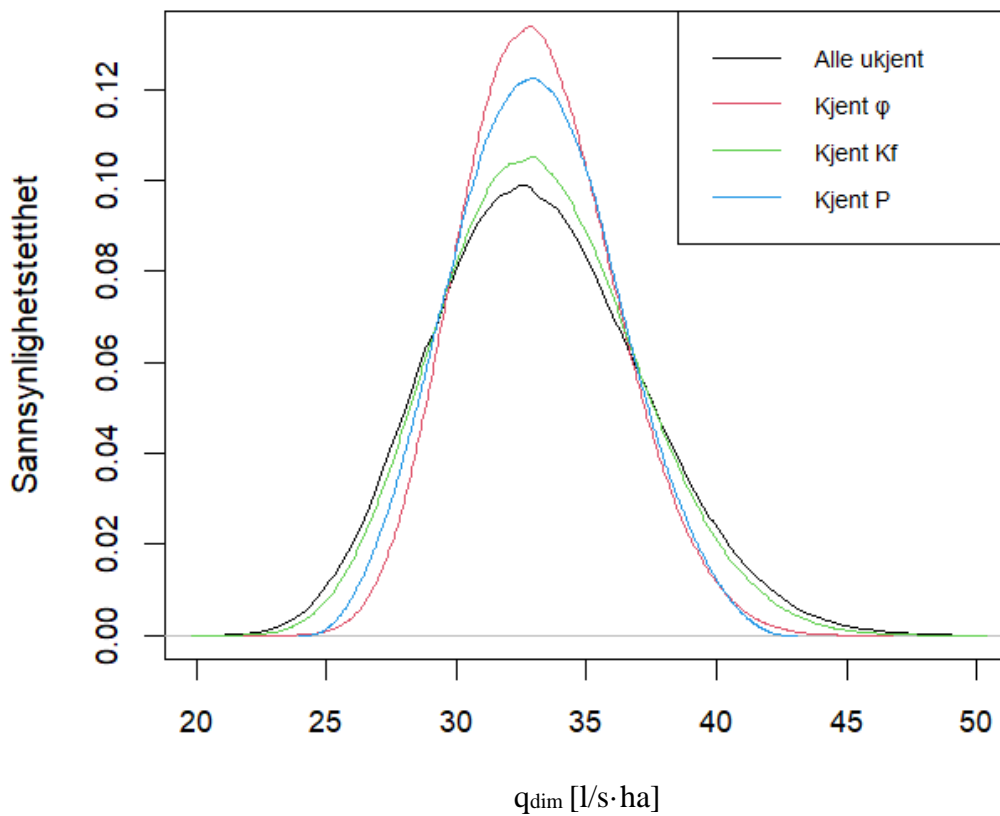


Figur 10: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentakintervall på 2 år og varighet på 30 min, simulert via Monte Carlo.

¹ Merk at de horisontale aksene for Figur 11, Figur 12 og Figur 13 er forskjellige.



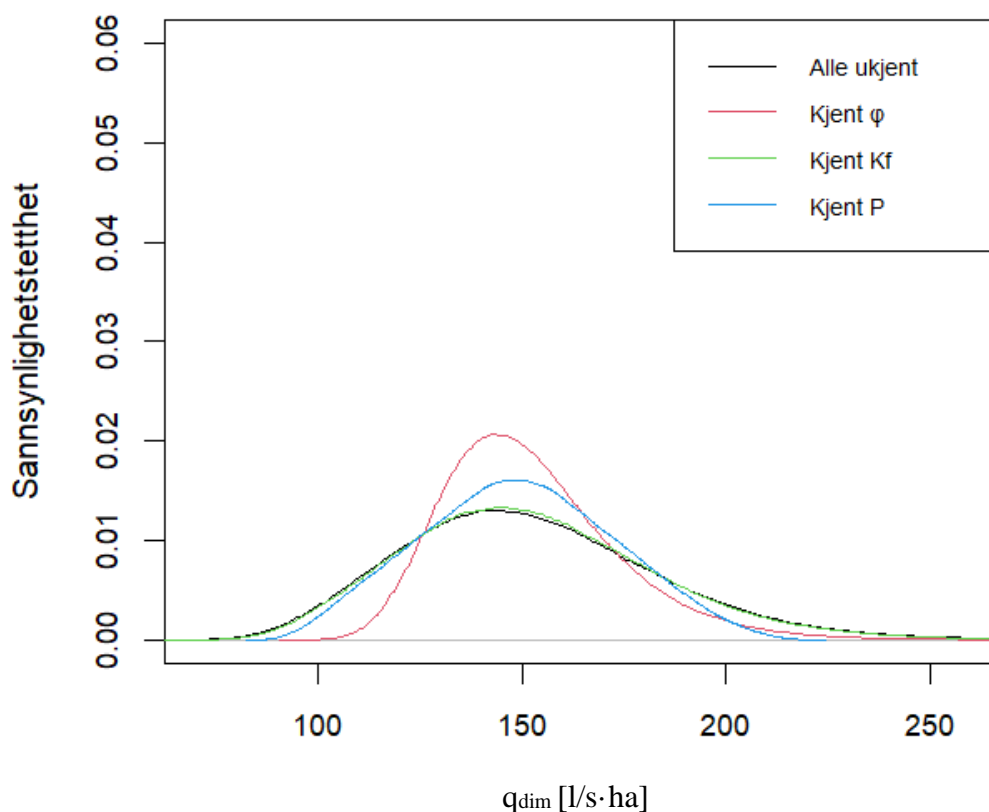
Figur 11: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentakintervall på 2 år og varighet på 60 min, simulert via Monte Carlo.



Figur 12: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentakintervall på 2 år og varighet på 120 min, simulert via Monte Carlo.

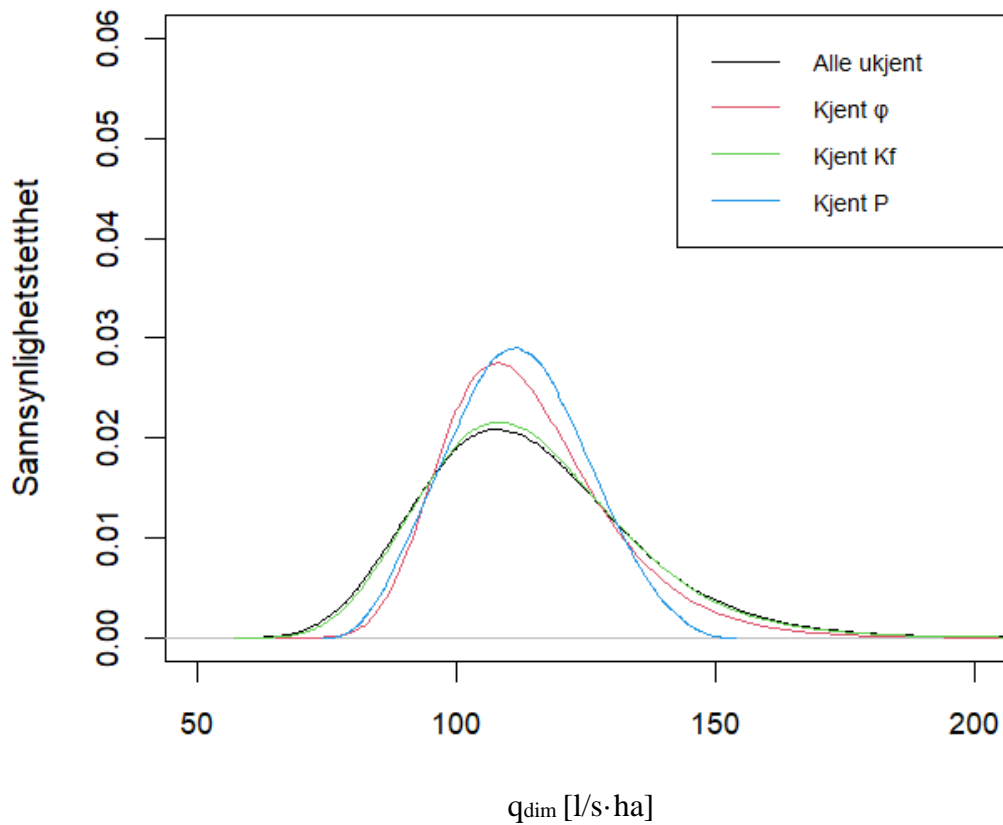
I henholdt til resultatene fra denne studien er det betydelig usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring og inngangsparameterne. Usikkerhet knyttet til avrenningskoeffisient (φ) er spesielt stor for de lave varighetene. Forskjell i fordelingene, valg og antakelser som ligger til grunn for usikkerhetsanalyse av den rasjonale formel i denne studien, sammenlignet med studien utført av Bondeson (2021) fører til helt ulike resultater.

Som det var forventet er variasjonen i spesifikk dimensjonerende vannføring større for nedbør ved 20 års gjentakintervall (se *Figur 13*, *Figur 14* og *Figur 15*)².

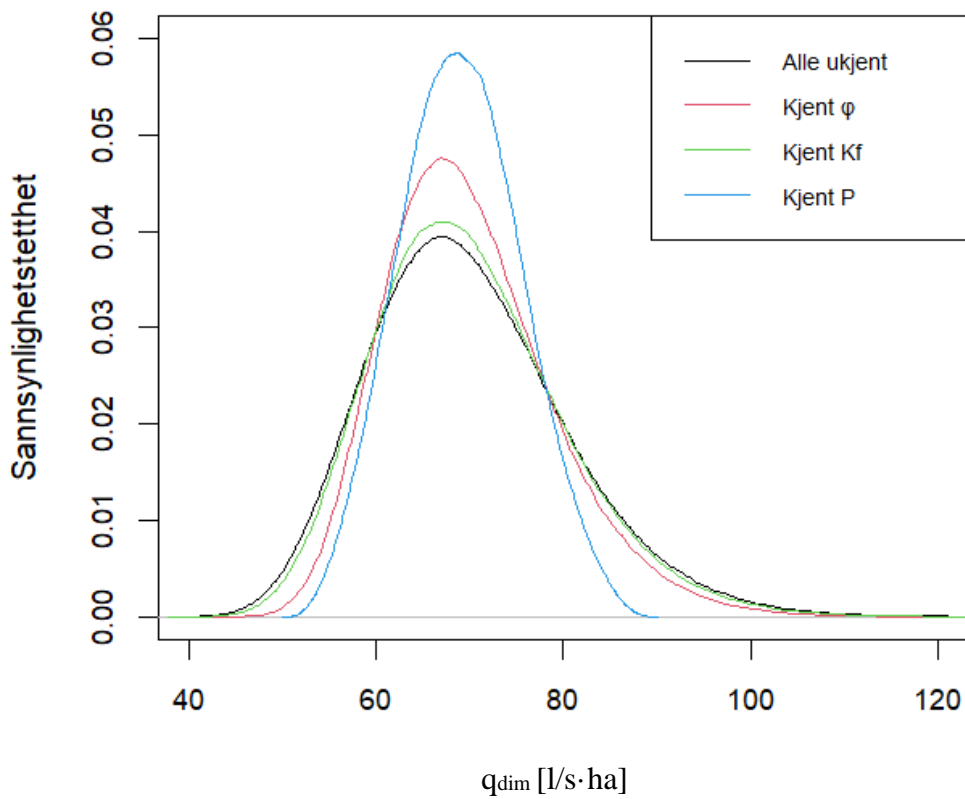


Figur 13: Sannsynlighetsfordelinger av spesifikk dimensjonerende vannføring for gjentakintervall på 20 år og varighet på 30 min, simulert via Monte Carlo.

² Merk at de horisontale aksene for *Figur 13*, *Figur 14* og *Figur 15* er forskjellige.



Figur 14: Sannsynlighetsfordelinger av spesifik dimensjonerende vannføring for gjentakintervall på 20 år og varighet på 60 min, simulert via Monte Carlo.



Figur 15: Sannsynlighetsfordelinger av spesifik dimensjonerende vannføring for gjentakintervall på 20 år og varighet på 120 min, simulert via Monte Carlo.

5- og 95-persentiler av sannsynlighetsfordelingene er vist i *Tabell 5* under.

Tabell 5: 5- og 95-persentiler for spesifikk dimensjonerende vannføring ved 2 års og 20 års gjentakintervall og 30, 60 og 120 min varighet. Persentilene presenterer usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring når en bestemt inngangsparameter er satt til en fast kjent verdi basert på verdiene fra Tabell 2.

Kjent inngangsparameter	P5 [l/s·ha]	P95 [l/s·ha]
<u>2 års nedbør</u>		
<u>30 min varighet:</u>		
Alle ukjent	46	85
Kjent φ	55	76
Kjent K_f	47	84
Kjent P	47	81
<u>60 min varighet:</u>		
Alle ukjent	38	61
Kjent φ	42	57
Kjent K_f	39	60
Kjent P	39	58
<u>120 min varighet:</u>		
Alle ukjent	27	40
Kjent φ	28	38
Kjent K_f	27	39
Kjent P	28	38
<u>20 års nedbør</u>		
<u>30 min varighet:</u>		
Alle ukjent	105	208
Kjent φ	122	191
Kjent K_f	105	206
Kjent P	109	188
<u>60 min varighet:</u>		
Alle ukjent	170	299
Kjent φ	184	288
Kjent K_f	171	299
Kjent P	90	133
<u>120 min varighet:</u>		
Alle ukjent	41	79
Kjent φ	42	75
Kjent K_f	42	78
Kjent P	58	80

Rangeringen av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring varierer etter ulike gjentakintervall og nedbørvarighet (se *Tabell 6*).

Tabell 6: Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i spesifikke dimensjonerende vannføring (q_{dim}) for valgte gjentakintervall (2, 5, 10, 20, 25 og 50 år) med 30, 60 og 120 min varighet.

Gjentaksintervall	Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet
<u>2 år gjentakintervall:</u>	
30 min varighet	$\varphi > I > K_f$
60 min varighet	$\varphi > I > K_f$
120 min varighet	$\varphi = I > K_f$
<u>5 år gjentakintervall:</u>	
30 min varighet	$\varphi > I > K_f$
60 min varighet	$\varphi > I > K_f$
120 min varighet	$\varphi = I > K_f$
<u>10 år gjentakintervall:</u>	
30 min varighet	$\varphi > I > K_f$
60 min varighet	$\varphi = I > K_f$
120 min varighet	$I > \varphi > K_f$
<u>20 år gjentakintervall:</u>	
30 min varighet	$\varphi > I > K_f$
60 min varighet	$I > \varphi > K_f$
120 min varighet	$I > \varphi > K_f$
<u>25 år gjentakintervall:</u>	
30 min varighet	$\varphi > I > K_f$
60 min varighet	$I > \varphi > K_f$
120 min varighet	$I > \varphi > K_f$
<u>50 år gjentakintervall:</u>	
30 min varighet	$I > \varphi > K_f$
60 min varighet	$I > \varphi > K_f$
120 min varighet	$I > \varphi > K_f$

For et gjentakintervall på 2 år ved varighet på 30 og 60 min er avrenningskoeffisient den mest usikre inngangsparameteren. Jo høyere gjentakintervall, desto mer usikker blir nedbøren. Som det kommer frem på Norsk Klimaservicesenter sine nettsider kan dette skyldes begrensninger i nedbørobservasjoner for større gjentakintervaller, da slike ekstreme værhendelser er sjeldnere (Klimaservicesenter).

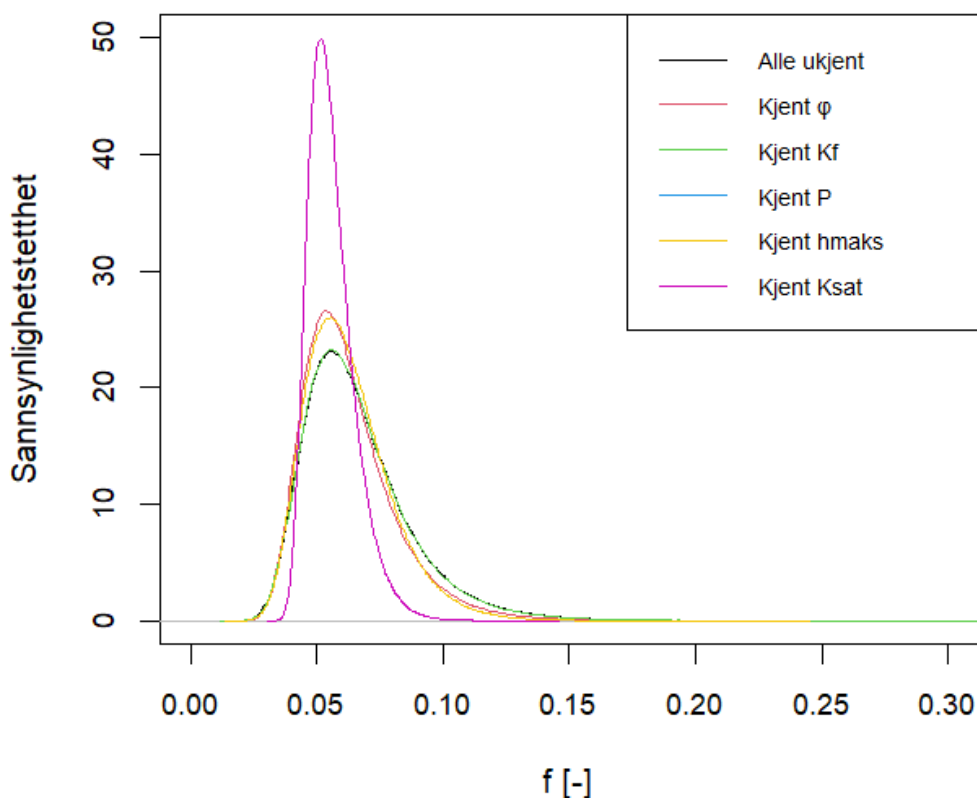
Usikkerheten som ble analysert ved den rasjonale formelen, kan i stor grad forklares av faste verdier som blir antatt for inngangsparameterne; nedbør, klimafaktor og avrenning. Disse verdiene blir som oftest valgt basert på dimensjonerende gjentakintervall og varighet, samt en grov vurdering av overflateforholdene i område.

Usikkerhetsbidrag av nedbør varierer avhengig av valgt gjentakintervall og varighet. På den annen side varierer usikkerhetsbidrag fra avrenningskoeffisient med valgt varighet. I praktisk bruk av den rasjonale formelen for ulikt gjentakintervall og varighet, kan dette brukes som en indikasjon på hvilken inngangsparameter som trenger ytterligere undersøkelse og er tilknyttet usikkerhet som kan potensielt reduseres.

Usikkerhet knyttet til avrenningskoeffisient basert på data fra et lite begrenset område (8 m²), er tilstrekkelig til å overskygge usikkerhetsbidraget fra nedbør. Med andre ord, selv om nedbøren kan variere, kan den minste usikkerheten knyttet til avrenningskoeffisienten ha større innvirkning på resultatene enn nedbør.

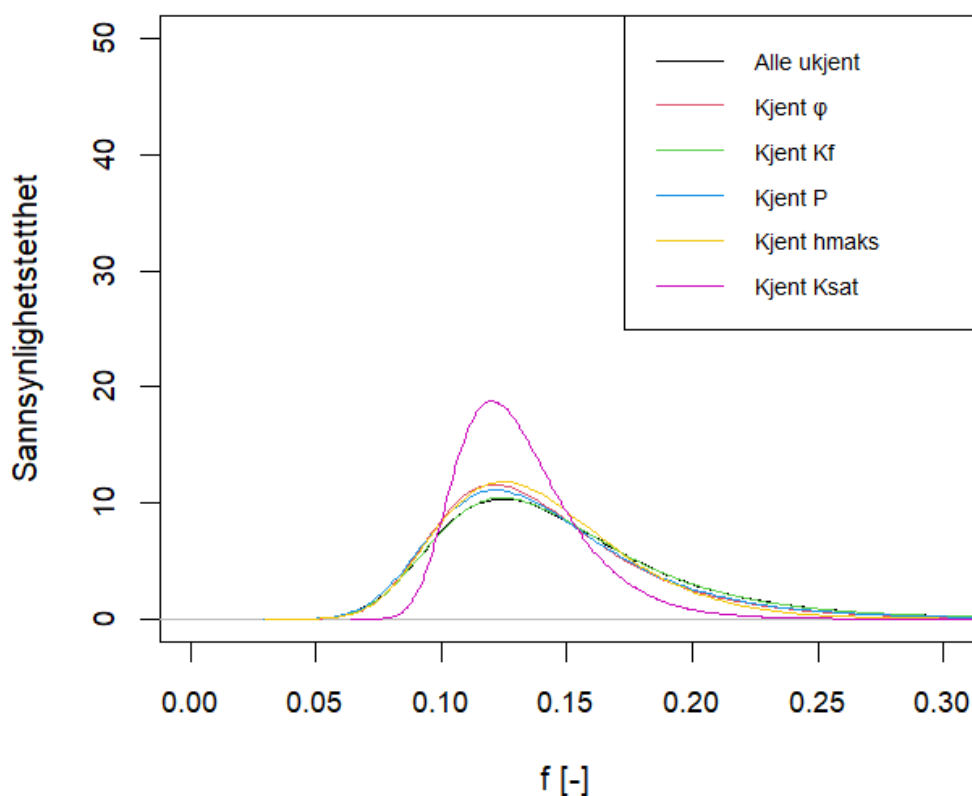
3.2.2 Overflateareal regnbed

Sannsynlighetsfordeling av andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt (f) for nedbør med gjentakintervall på 2 år og 20 år er vist i *Figur 16* og *Figur 17* under.



Figur 16 Sannsynlighetsfordelinger av f for gjentakintervall på 2 år simulert med Monte Carlo.

Som forventet når gjentakintervallet øker til 20 år, blir usikkerhet i nedbør større, og variasjonen knyttet til f øker betydelig enn hva den var ved 2 års nedbør (se *Figur 17*).



Figur 17 Sannsynlighetsfordelinger av f for gjentakintervall på 20 år simulert med Monte Carlo.

I henholdt til resultatene fra Monte Carlo simuleringene basert på verdiene i *Tabell 1* og *Tabell 2*, er det stor variasjon i overflateareal av regnbed (f) avhengig av verdiene for inngangsparameterne (Se *Figur 7* og *Figur 8*, og *Tabell 8*).

Tabell 7 under viser 5- og 95-persentil av sannsynlighetsfordelingene ved nedbør med 2 års og 20 års gjentakintervall.

*Tabell 7: 5- og 95-persentilene for andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt (f) ved 2 års og 20 års nedbør. Persentilene presenterer usikkerhet i f når en bestemt inngangsparameter er satt til en fast kjent verdi basert på verdiene fra *Tabell 2*.*

Kjent inngangsparameter	P5 [-]	P95 [-]
<u>2 års nedbør</u>		
Alle ukjent	0,039	0,107
Kjent ϕ	0,039	0,098
Kjent K_f	0,039	0,106
Kjent P	0,039	0,105
Kjent h_{maks}	0,039	0,094
Kjent K_{sat}	0,044	0,073
<u>20 års nedbør</u>		
Alle ukjent	0,087	0,237
Kjent ϕ	0,087	0,221
Kjent K_f	0,087	0,236
Kjent P	0,086	0,225
Kjent h_{maks}	0,088	0,205
Kjent K_{sat}	0,099	0,177

Variasjon i K_{sat} og h_{maks} i denne analysen, er større enn variasjon i avrenningskoeffisient og nedbør som hadde store bidrag til usikkerhet ved spesifikk dimensjonerende avrenning. Når verdien av K_{sat} er kjent (20,2 cm/t), har f minst variasjon. Dette viser at K_{sat} er den mest usikre inngangsparameteren i formel (2). Det er altså større usikkerhet knyttet til K_{sat} , sammenlignet med de andre inngangsparameterne. Resultatene fremviser også stor usikkerhet ved h_{maks} og φ , men mindre enn K_{sat} .

I praktisk sammenheng kan den analyserte usikkerhet i f innebære stor risiko for at det kan oppstå avvik mellom forventet og faktisk ytelse av et regnbed. Dette kan tyde på at de faktiske utfordringene og usikkerhetene ved dimensjonering av regnbed ikke blir vurdert.

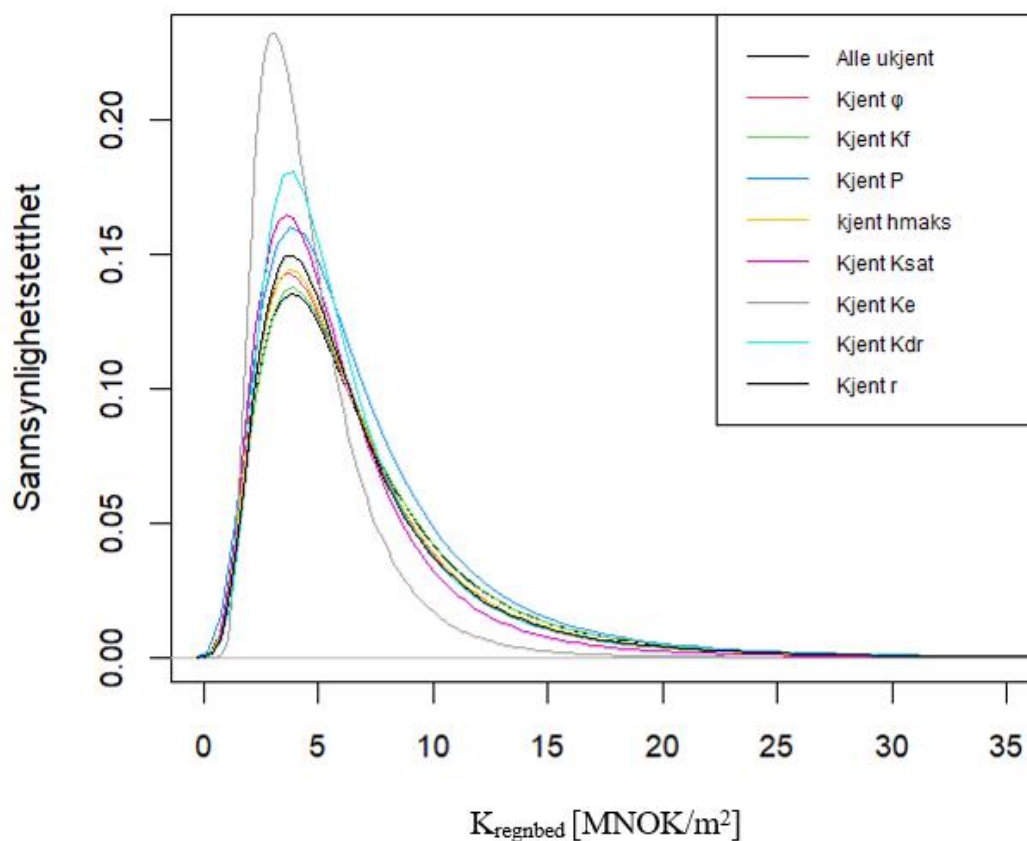
Rangering av inngangsparameterenes bidrag til usikkerhet i f er vist i *Tabell 8* under. Resultatene viser at K_{sat} og h_{maks} bidrar mest til usikkerhet, uavhengig av valgt gjentakintervall. Når gjentakintervallet er på 50 år, er usikkerheten knyttet til nedbør stor nok til å overskygge usikkerhetsbidrag av φ .

Tabell 8: Rangering av inngangsparameterenes bidrag til usikkerhet i andel overflateareal til regnbed av areal til nedbørsfelt (f) for de valgte gjentakintervall (2, 5, 10, 20, 25, 50 år).

Gjentaksintervall	Rangering av inngangsparameterenes bidrag til usikkerhet
2 år	$K_{\text{sat}} > h_{\text{maks}} > \varphi > P > K_f$
5 år	$K_{\text{sat}} > h_{\text{maks}} > \varphi > P > K_f$
10 år	$K_{\text{sat}} > h_{\text{maks}} > \varphi > P > K_f$
20 år	$K_{\text{sat}} > h_{\text{maks}} > \varphi > P > K_f$
25 år	$K_{\text{sat}} > h_{\text{maks}} > \varphi > P > K_f$
50 år	$K_{\text{sat}} > h_{\text{maks}} > P > \varphi > K_f$

3.2.3 Kostnader

Sannsynlighetsfordeling av nåverdikostnad for regnbed (K_{regnbed}) utført for en million Monte Carlo simuleringer er vist i *Figur 18*. Resultatene viser betydelig usikkerhet i K_{regnbed} avhengig av verdiene til inngangsparameterne i formel (2) og formel (5). Fordelingene viser minst variasjon i nåverdikostnad, når verdien av K_e er kjent. Dette betyr at K_e har størst usikkerhetsbidrag sammenlignet med de andre inngangsparameterne. Det er også betydelig grad av usikkerhet i K_{sat} og K_{dr} , men denne usikkerheten er noe mindre enn usikkerheten som er knyttet til K_e .



Figur 18 Sannsynlighetsfordelinger av nåverdikostnad for regnbedareal som andel av nedbørsfelt dimensjonert for gjentakintervall på 2 år, simulert med Monte Carlo.

Tabell 9 under viser 5- og 95-persentil av fordelingene for K_{regnbed} .

Tabell 9: 5- og 95-persentilene for nåverdikostnad av regnbed (K_{regnbed}) ved 2 års nedbør. Persentilene presenterer usikkerhet i K_{regnbed} når en bestemt inngangsparameter er satt til en fast kjent verdi basert på verdiene fra Tabell 2.

Kjent inngangsparameter	P5 [MNOK/ha]	P95 [MNOK/ha]
<u>2 års nedbør</u>		
Alle ukjent	1,99	16,70
Kjent ϕ	1,93	15,60
Kjent K_f	1,99	16,61
Kjent P	1,97	16,42
Kjent h_{maks}	1,95	15,36
Kjent K_{sat}	1,89	13,20
Kjent K_e	1,93	9,58
Kjent K_{dr}	2,14	15,25
Kjent r	2,04	15,75

Tabell 10 nedenfor viser rangeringen av inngangsparameterenes bidrag til usikkerhet i nåverdikostnad av regnbed. Som presentert blir rangeringen endret ved 50 års gjentakintervall, når usikkerhet i nedbør overskygger usikkerhetsbidrag tilknyttet diskonteringsrente.

Tabell 10 Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet i nåverdikostnad for regnbed, dimensjonert for nedbør av ulike gjentakintervall (2, 5, 10, 20, 25, 50 år).

Nåverdikostnad	Rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet
<u>Gjentaksintervall</u>	
2 år	$K_e > K_{sat} > K_{dr} > h_{maks} > \varphi > r > P > K_f$
5 år	$K_e > K_{sat} > K_{dr} > h_{maks} > \varphi > r > P > K_f$
10 år	$K_e > K_{sat} > K_{dr} > h_{maks} > \varphi > r > P > K_f$
20 år	$K_e > K_{sat} > K_{dr} > h_{maks} > \varphi > r > P > K_f$
25 år	$K_e > K_{sat} > K_{dr} > h_{maks} > \varphi > r > P > K_f$
50 år	$K_e > K_{sat} > K_{dr} > h_{maks} > \varphi > P > r > K_f$

3.3 Reduksjon av usikkerhet

For å redusere den kvantifiserte usikkerheten ved dimensjonerende overvannsavrenning, regnbedareal og kostnader for regnbed, er det nødvendig å redusere variasjonene tilknyttet inngangsparameterne som hadde størst bidrag til den totale usikkerheten.

3.3.1 Avrenningskoeffisient (φ)

Avrenningskoeffisient er en viktig inngangsparameter, og bidrar til spesielt stor usikkerhet i dimensjonerende overvannsavrenning. Dette fremmer stort behov for økt kunnskap og informasjon om inngangsparameteren. Utføring av flere målinger for nedbør og avrenning i et større urbant område over lengre periode enn 4 år, kan bidra til å identifisere og redusere feil og unøyaktigheter i dataene, og bedre forstå den tidsmessige og romlige variasjonen av avrenning. Det er imidlertid viktig å presisere at slike målinger vil kreve betydelig innsats, da avrenning i et gitt område er sterkt påvirket av lokale forhold som gropmagasinerings på overflaten og metningsgrad av bakken som følge av tidligere nedbør (Bondeson, 2021).

3.3.2 Hydraulisk konduktivitet (K_{sat})

Resultatene fra denne studien antyder at dersom verdien av K_{sat} hadde vært kjent (20,2 cm/t), ville usikkerheten i f blitt redusert med mer enn halvparten. Dette fremmer stort behov for målinger av K_{sat} -verdi i ulike regnbed. Målingene kan være til hjelp for å bli sikrere på fordeling og variasjon av inngangsparameteren. For å undersøke og vurdere sesongmessige (temperaturrendringer) endringer i K_{sat} , kan det være hensiktsmessig å gjenta de samme målingene for ulike sesonger i året.

Det argumenteres for at vegetasjon og planter i et regnbed og tettheten har stor betydning for infiltrasjonsevne, ved at røttene til planter bidrar til å kontinuerlig løsne opp jorda og øke permeabiliteten (Atchison et al., 2006; Paus et al., 2016). Basert på dette kan det opprettholdes høy og jevn K_{sat} ved å sette større fokus på beplantning i regnbedet. Riktig type planter og økt tetthet ved etablering kan opprettholde høy og jevn K_{sat} , som kanskje er en viktig suksessfaktor for å lykkes med regnbed som effektive overvannstiltak. For å støtte plantevekst i regnbed, er det

nødvendig å velge jord med tilstrekkelig mengde finstoff (leire), samtidig som jorden må være tilstrekkelig permeabel for infiltrasjon av vann gjennom jorda (Hunt & White, 2001). Dette kan være en langsiktig investering som vil betale seg over tid, ved at regnbedet vil kunne fungere mer effektivt og kanskje redusere behovet for andre tiltak.

En internasjonal studie om infiltrasjonsvariasjon i urbane grønne infrastruktur av Ebrahimian et al. (2019), fremstår at for lognormalfordelte K_{sat} -verdier kan det geometriske gjennomsnittet brukes som en representativ verdi for den total hydrauliske konduktiviteten. I studien fremgår det en rekke anbefalinger for å redusere variasjon i hydraulisk konduktivitet og forbedre infiltrasjonsytelsen i tiltak som regnbed:

- Det er behov for mer forskning for å bestemme minimumskravet for optimalt antall infiltrasjonsmålinger per regnbed. K_{sat} verdi vil variere for forskjellige deler av et regnbed, og det er nødvendig for å undersøke den beste plasseringen av målinger.
- Utføre temperaturmålinger av jord og vann som en del av overvåkningsmålinger ved et regnbed.
- Unngå komprimering av opprinnelig jord og filtermedium ved å markere eller gjerde av det aktuelle området, og beskytte det mot oppstrøms sediment og erosjon.
- Velge stedstilpasset plante og filtermedium med tilstrekkelig vanning under tørke- og etableringsperioder og vedlikehold.
- Vurdere bruk av opprinnelig jord, forutsatt at de har tilstrekkelig infiltrasjonskapasitet, er stabile og ikke er forurenset. Dette kan bidra til betydelig reduksjon i kostnader ved å redusere mengden jord som må graves opp, fjernes og gjenfylles med filtermedium. Dette minimerer behov for vedlikeholdsaktiviteter, og kan følgelig redusere potensiell jordkomprimering.

3.3.3 *Maksimal vannstand (h_{maks})*

I motsetning til K_{sat} er h_{maks} som en designparameter mindre utsatt for å endre seg over tid. Resultatene viste at Monte Carlo simuleringene basert på trekantfordeling av h_{maks} med verdier fra *Tabell 1* og *Tabell 2*, kan ha stor påvirkning på utfallet av analysen. En stor del av usikkerhet i f som følger av variasjonen i h_{maks} , kan bli redusert ved å være mer bevisst om verdiene som velges for h_{maks} ved planlegging og dimensjonering av regnbed.

3.3.4 *Etablerings- og driftskostnader (K_e og K_{dr})*

Basert på resultatene for nåverdikostnad av regnbed fra denne studien, er K_e , K_{sat} og K_{dr} de viktigste inngangsparameterne når det gjelder bidrag til usikkerhet i K_{regnbed} . For å redusere usikkerheten er det nødvendig med større og oppdatert data for enhetskostnad ved etablering og drift av regnbed. Flere av tiltakshaverne som ble kontaktet i forbindelse med datainnsamling for kostnader av regnbed, var i noen grad tilbakeholdne med å dele informasjon. En alternativ er å opprette et felles registreringssystem for kostnader av regnbed med spesielt fokus på etableringskostnadene, da de bidrar til størst usikkerhet ved kostnader for regnbed. Systemet vil kontinuerlig bli oppdatert med rapportering av de medgåtte kostnadene til etablering og drift av

regnbed. Rapporteringen kan inkludere beskrivelse av blant annet type regnbed, dybde og type jord, valgt plantetype og tetthet. Dette vil bidra til å skape en nøyaktig og pålitelig kunnskapsbase for regnbedkostnader, og kunne gi grunnlag for mer presist kostnadsanslag og redusert usikkerhet.

3.3.5 Diskonteringsrente (r)

Usikkerheten knyttet til diskonteringsrente (r) kan kanskje reduseres i en sammenheng som utfører usikkerhetsanalyse for kostnader og nytten av regnbed. Ved å undersøke hvor mye overvann regnbed håndterer i løpet av 40 år, sammenlignet med nåverdikostnadene av regnbed for samme diskonteringsperiode, kan diskonteringsrente betraktes som en inngangsparameter med likt bidrag til usikkerhet i nåverdikostnad og nytte av regnbed.

3.4 Vurdering av resultatene

Den største utfordringen ved Monte Carlo simulering som metode for analyse av usikkerhet er å identifisere fordelingen inngangsparameterne sannsynligvis vil ha (Macdonald & Strachan, 2001).

Selv om Monte Carlo simuleringer er en kraftig teknikk for å håndtere usikkerhet og hjelper til med å identifisere de viktigste usikkerhetsbidragene i hver analyse, er det viktig å presisere at de oppnådde resultatene er kun en tilnærming basert på fordelingene og verdiene for inngangsparameterne (*Tabell 1* og *Tabell 2*). Resultatene fra en Monte Carlo simulering kan alltid variere avhengig av hvilke fordelinger og verdier som brukes.

Areal av nedbørsfelt som ikke ble inkludert i denne studien, kan være en viktig inngangsparameter med stort usikkerhetsbidrag. Dette kan undervurdere den totale usikkerheten i analysene. Videre er klimafaktoren en tidsavhengig inngangsparameter, men dette ble ikke tatt hensyn til i denne studien. Den har sannsynligvis hatt samme grad av variasjon for alle varigheter, noe som gjør resultatene mindre nøyaktige.

En svakhet med denne studien er at datagrunnlaget for avrenningskoeffisient er fra et svart lite tak på 8 m², og er ikke representativt for store områder med veldig ru overflate. I realiteten er et nedbørsfelt som bidrar til avrenning, mye større enn det svarte taket. Dette kan undervurdere usikkerheten knyttet til avrenningskoeffisient, og kan påvirke rangering av inngangsparameterens bidrag til usikkerhet ved hver analyse.

Dataene for K_{dr} er estimerte verdier på drift og vedlikehold av stauderegnbed, i tillegg til at de ikke inkluderer kostnad medgått til vanning av plantene, noe som gjør resultatene mindre nøyaktige. Det finnes forskjellige typer regnbed og beplantning som disse dataene ikke kan generaliseres for. Ved å bruke estimer i stedet for faktiske verdier, kan det være en tendens til å overvurdere kostnadene, og dermed overestimere usikkerheten knyttet til K_{dr} og nåverdikostnad for regnbed. På samme måte kan ekskludering av kostnader forbundet med vanning av plantene, bidra til at usikkerheten i K_{dr} undervurderes.

Det er viktig å være bevisst over at selv om dataene for etableringskostnad er faktiske verdier, inkluderer de ikke anleggsomkostninger ved gjennomføring av regnbedprosjektene. Dette kan være alle øvrige kostnader som forberedende arbeid, fjerning av eksisterende dekke, vurderingen

av kvalitet på masser til deponi og alt rundt planlegging, anskaffelse, rigging, byggetillatelse og trafikkavklaring. Kostnadene som går til dette, er som oftest kombinasjon av faste og variable kostnader.

4 Konklusjoner

Formålet med denne oppgaven har vært å analysere usikkerhet ved dimensjonerende overvannsavrenning, regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed, i form av Monte Carlo simuleringer og basert på ulike fordelinger av inngangsparameterne. Ved hjelp av litteraturstudier og statistiske tester ble fordelingen av inngangsparameterne sannsynliggjort. IVF-statistikken fra Klimaservicesentret var GEV-fordelt, mens måledataene på spissavrenningskoeffisient og maksimalvannstand fulgte trekantfordeling. Videre var hydraulisk konduktivitet og enhetskostnad for etablering av regnbed lognormalfordelt, mens diskonteringsrenten og enhetskostnad for drift var gammafordelte. Klimafaktoren derimot ble sannsynliggjort til å være uniformfordelt.

Studien viste at det er stor usikkerhet i både rasjonale formel, regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed, avhengig av variasjonen i inngangsparameterne. Som forventet, økte usikkerheten for lengre gjentaksintervall. Den første usikkerhetsanalysen av rasjonale formel viste at bidrag av usikkerhet tilknyttet avrenningskoeffisient og nedbørintensitet, varierer med valgt varighet og gjentaksintervall. For 2 års gjentaksintervall og 30 min varighet, hadde avrenningskoeffisient størst variasjon sammenlignet med de andre inngangsparameterne. Når varigheten økte til 60 og deretter 120 min, ble usikkerheten i dimensjonerende spesifikk vannføring mindre, samtidig som usikkerhet i avrenningskoeffisient og nedbørintensitet ble mer likt. I usikkerhetsanalysen for 50 års gjentaksintervall, ble nedbørintensitet identifisert som den mest usikre inngangsparameteren for de tre varighetene (30, 60 og 120 min).

Hydraulisk konduktivitet har størst bidrag til usikkerhet ved regnbedareal for alle de valgte varighetene (2, 5, 10, 20, 25 og 50 år), etterfulgt av maksimal vannstand. Dette er nyttig kunnskap som kan bidra til å planlegge og designe regnbed med et høyere presisjon. Avrenningskoeffisient, nedbør og til sist klimafaktoren bidrar også til noe usikkerhet. Resultatene for usikkerhetsanalysen med 50 års gjentaksintervall, viste at nedbør har større usikkerhetsbidrag enn avrenningskoeffisient.

Den siste usikkerhetsanalysen i denne studien ble utført for nåverdikostnad av regnbed. Denne bygget på usikkerhetsanalysen av regnbedareal og inkluderte etablerings- og driftskostnader, samt diskonteringsrente med en diskonteringsperiode på 40 år. I denne analysen ble det undersøkt at enhetskostnad for etablering av regnbed har størst variasjon og bidrar til mest usikkerhet i nåverdikostnad for regnbed, etterfulgt av hydraulisk konduktivitet og driftskostnad. Deretter følger maksimal vannstand, avrenningskoeffisient, diskonteringsrente, nedbør og til slutt klimafaktoren. Ved gjentaksintervall på 50 år, blir rangeringen endret ved at nedbøren bidrar til større usikkerhet enn diskonteringsrente. Studien viser videre at variasjon i klimafaktoren har veldig lite å si for usikkerhet i spesifikk dimensjonerende vannføring, regnbedareal og nåverdikostnad for regnbed.

For å håndtere og redusere usikkerhet er det viktig å sette større fokus på de inngangsparameterne som er påvist å ha de største bidragene til usikkerhet. Mer data på avrenningskoeffisient, målt over en større og ru overflate kan gi bedre kunnskap og sikrere

fordeling for inngangsparameteren. Videre ved å velge riktig vegetasjonstype og øke plantetettheten kan det opprettholdes bedre infiltrasjon i regnbed over tid. Røttene til plantene bidrar til å kontinuerlig skape makroporer i jorda og føre til et jevnt, høy K_{sat} i regnbed. Utføring og analyse av flere målinger for K_{sat} i ulike typer regnbed, kan hjelpe til å bedre forstå variasjonen og fordelingen av inngangsparameteren, og forutsi denne med valg av filtermedium, vegetasjon, drens-system osv. En stor del av usikkerhet i nåverdikostnader for regnbed følger av variasjonen i enhetskostnader for etablering, hydraulisk konduktivitet og enhetskostnad for drift av regnbed. Større og mer pålitelig data for enhetskostnad ved etablering og drift av regnbed, samt redusert variasjon i mettet hydraulisk konduktivitet kan gi betydelig reduksjon av usikkerhet i nåverdikostnader for regnbed.

4.1 Videre arbeid

- Utføre usikkerhetsanalysene for bestemte caseområder, inkludere areal av nedbørsfelt som en inngangsparameter og undersøke om usikkerheten og rangeringen av usikkerhetsbidrag tilknyttet inngangsparameterne blir endret.
- Utføre usikkerhetsanalysene for andre fordelinger av inngangsparameterne og se om resultatene er annerledes enn det som ble funnet i denne studien.
- Undersøke om det er lønnsomt å bygge regnbed ved å analysere usikkerhet i mengden overvann som blir håndtert i regnbed via en kost-nytte-analyse.

Referanser

- AgriMetSoft. (2019). *Distributions Calculators*. Tilgjengelig fra: <https://agrimetsoft.com/distributions-calculator/>.
- Atchison, D., Potter, K. & Severson, L. (2006). *Design guidelines for stormwater bioretention facilities*: University of Wisconsin Water Resources Institute Tilgjengelig fra: <https://publications.aqua.wisc.edu/product/design-guidelines-for-stormwater-bioretention-facilities/>.
- Behrouz, M. & Alimohammadi, S. (2018). Uncertainty analysis of flood control measures including epistemic and aleatory uncertainties: Probability theory and evidence theory. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23 (8). doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001675.
- Bondeson, S. (2021). *Uncertainty analysis of the rational method in stormwater management*. Masteroppgave. Department of architecture and civil engineering. Gothenburg: Chalmers university of technology. Tilgjengelig fra: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/2afe5fb1-f6bf-4483-b7d2-7b92c49fc795/content>.
- Cristiano, E., ten Veldhuis, M.-C. & van de Giesen, N. (2017). Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas – a review. *Hydrology and earth system sciences*, 21: 3859-3878. doi: 10.5194/hess-21-3859-2017.
- Dyrrdal, A. V., Lutz, J. & Grinde, L. (2022). *IVF-verdier for norske nedbørstasjoner*. I: 02/2022, R. f. M. i. (red.). Tilgjengelig fra: https://www.met.no/publikasjoner/met-report/_attachment/download/a7c730df-6320-488f-bfbc-f56974a418e1:a6dbf376c8787687a0ad7f3189eb7210ad1de263/MET-report-02-2022.pdf.
- Ebrahimian, A., Sample-Lord, K., Wadzuk, B. & Traver, R. (2019). Temporal and spatial variation of infiltration in urban green infrastructure. *Hydrological Processes*, 34 (4): 1016-1034. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.13641>.
- Eckart, J., Sieker, H., Vairavamorthy, K. & Alsharif, K. (2012). Flexible design of urban drainage systems: demand led research for Hamburg-Wilhelmsburg. *Reviews in environmental science and biotechnology*, 11 (1): 5-10. doi: 10.1007/s11157-011-9256-5.
- Fletcher, T. D., Andrieu, H. & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in water resources*, 51: 261-279. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.09.001.
- Gollier, C. & Weitzman, M. L. (2010). How should the distant future be discounted when discount rates are uncertain? *Economics letters*, 107 (3): 350-353. doi: 10.1016/j.econlet.2010.03.001.
- Hunt, W. & White, N. (2001). *Designing Rain Gardens (Bioretention Areas)*. I: UrbanWaterways (red.): North Carolina Cooperative Extension Service.
- Hunt, W. F., Davis, A. P. & Traver, R. G. (2011). Meeting Hydrologic and Water Quality Goals through Targeted Bioretention Design. 10 (6). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000504).
- Klakegg, O. J. (2003). *Felles begrepsapparat*. I: Finansdepartementet, R. f. (red.). Kvalitetssikring av kostnadsoverslag, herunder risikoanalyse for store statlige investeringer. Tilgjengelig fra: https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1262021752/054_rapport_03_felles_begrep_sapparat%20_v1.pdf.
- Klimaservicesenter, N. *Hjelp til valg av IVF*. Tilgjengelig fra: <https://klimaservicesenter.no/kss/vrdata/ivf-veiledning> (lest 10.04.2023).
- Koumoura, K., Feloni, E. G., Londra, P., Baltas, E. & Tsihrintzis, V. A. (2018). Uncertainty analysis in sizing rainwater harvesting tanks in an isolated island with limited water resources. 7. doi: 10.30955/gnj.002535.

-
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Norsk Vann rapport*.
- Lunde, E. W. (2020). *Infiltrasjon i regnbed og val av verdi for metta hydraulisk konduktivitet ved dimensjonering*. Masteroppgave. Ås: Norwegian University of Life Sciences. Tilgjengelig fra: https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2678475/Lunde_Masteroppg%c3%a5ve.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Lysne, V. & Olsen, T. (2016). Veiledende eller villedende? En simulert studie. *Norsk tidsskrift for ernæring*, 14 (4): 28-31.
- Macdonald, I. & Strachan, P. (2001). Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings*, 33 (3): 219-227. doi: 10.1016/S0378-7788(00)00085-2.
- Magnussen, K., Wingstedt, A., Rasmussen, I. & Reinvang, R. (2015). *Kostnader og nytte ved overvannstiltak*. Rapport fra Vista Analyse AS Oslo: Miljødirektoratet Tilgjengelig fra: <https://www.vista-analyse.no/site/assets/files/5632/kostnaderognyttevedovervannstiltakm305.pdf>.
- NOU 2015: 16. (2015). *Overvann i byer og tettsteder* Norges offentlige utredninger Oslo.
- NYSDEC. (2022). *New York State Stormwater Management Design Manual*. New York State Department of Environmental Conservation.
- Paus, K. H. & Braskerud, B. C. (2013). Forslag til dimensjonering og utforming av regnbed for norske forhold.
- Paus, K. H. & Egeberg, J. R. (2020). *Evaluering av kostnader og nytte ved et utvalg av blågrønne overvannstiltak* Upublisert manuskript.
- Persson, G., Wikberger, C. & Amorim, J. H. (2018). *Klimatanpassa nordiska städer med grön infrastruktur*. Stockholm.
- Pripp, A. H. (2015). Hvorfor p-verdien er signifikant. *Tidsskrift for Den norske legeforening*.
- Shouhong, Z. & Yiping, G. (2013). Explicit Equation for Estimating Storm-Water Capture Efficiency of Rain Gardens. *HYDROLOGIC ENGINEERING*, 10. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000734.
- Siwec, E., Erlandsen, A. M. & Vennemo, H. (2018). City greening by rain gardens-costs and benefits. *Environmental Protection and Natural Resources*, 29 (1): 1-5.
- Smart, D. C. (2023). *Why Cost Uncertainty Is Lognormal*. Tilgjengelig fra: <https://christianbsmart.com/why-cost-uncertainty-is-lognormal/> (lest 30.03.2023).
- Stenius, S., Glad, P. A., Wang, T. K. & Væringstad, T. (2015). *Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt*: NVE.
- Weitzman, M. L. (2001). *Gamma discounting*. Tilgjengelig fra: https://scholar.harvard.edu/files/weitzman/files/gamma_discounting.pdf.
- Young, C. B., McEnroe, B. M. & Rome, A. C. (2009). Empirical determination of rational method runoff coefficients. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14 (12): 1283-1289. doi: abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000114.
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Australia. Tilgjengelig fra: <https://www.R-project.org/>.

Vedlegg A: Kode for Monte Carlo av den rasjonale formelen

```
# Inputverdier for GEV-fordeling av nedbør
loc <- 13.92
scale <- 1.06
shape <- -0.15

# Varighet av nedbør
tr <- 60

# 50% persentil av nedbørintensitet (l/s*ha) for tr på 60 min.
intensitet <- 39.7

# Inputverdier for Kf
Kf_a = 1.2
Kf_b = 1.4

# Inputverdier for avrenningskoeffisient
Phi_a <- 0.7
Phi_b <- 1.2

# Antall simuleringer
n = 1000000

P <- loc + scale/shape * (1/(-log(runif(n, 0, 1))))^(shape) - 1)
P <- P * (10000/(60*tr))
#P <- intensitet

Kf <- (runif(n, 0, 1))*(Kf_b-Kf_a)+Kf_a
#Kf <- ((runif(n, 0, 1)+runif(n, 0, 1))/2)*(Kf_b-Kf_a)+Kf_a
#Kf <- 1.3

Phi <- ((runif(n, 0, 1)+runif(n, 0, 1))/2)*(Phi_b-Phi_a)+Phi_a
#Phi <- 0.95

q_dim <- P*Phi*Kf

# 5 og 95% Persentiler av resultatene
q_dim_P5 <- quantile(q_dim, .05)
q_dim_P95 <- quantile(q_dim, .95)

print(q_dim_P5)
print(q_dim_P95)
print(q_dim_P95-q_dim_P5)

# Plotter sannsynlighetsfordeling av spesifikk dimensjonerende vannføring
plot(density(q_dim),
     xlab = "q [l/s*ha]",
     ylab = "Sannsynlighetstetthet",
     xlim = c(30,80),
     ylim = c(0,0.13),
     cex.axis = 0.9,
     cex.lab = 1
)

lines(density(q_dim), col = 2)
lines(density(q_dim), col = 3)
lines(density(q_dim), col = 4)

legend("topright",
      c("Alle ukjent", "Kjent φ", "Kjent Kf", "Kjent P"),
      col = 1:4,
      lty = 1,
      cex = 0.7
)
```

Vedlegg B: Kode for Monte Carlo av regnbedareal

```
# Definerer parameterne for GEV-fordeling av nedbør
locs <- c(4.67, 6.83, 9.24, 10.80, 12.48, 13.92, 15.99, 17.82, 20.71, 25.63, 31.24, 38.09)
scales <- c(0.36, 0.49, 0.73, 0.85, 0.90, 1.06, 1.15, 1.35, 1.37, 1.66, 1.64, 1.74)
shapes <- c(-0.29, -0.20, -0.12, -0.12, -0.13, -0.15, -0.18, -0.21, -0.18, -0.34, -0.36, -0.25)

# Definerer nedbørvarighetene
tr <- c(5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 360, 720, 1440)
nedbor <- c(4.80, 7.00, 9.50, 11.10, 12.80, 14.30, 16.40, 18.30, 21.20, 26.20, 31.80, 38.70)

# Definerer inputverdiene for hydraulisk konduktivitet
Ksat_median <- 34.3889
Ksat_std <- 1.0449

# Definerer inputverdiene for avrenningskoeffisient
Phi_a <- c(0.1, 0.2, 0.5, 0.5, 0.7, 0.7, 0.7, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.7)
Phi_b <- c(1.8, 1.2, 1.1, 1.1, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.3, 1.2, 1.2, 1.2)

# Definerer inputverdiene for maksimal vannstand
hmaks_min = 6.5
hmaks_maks = 35

# Definerer inputverdiene for klimafaktor
Kf_a = 1.2
Kf_b = 1.4

n <- 1000000 # Antall simuleringer
# Lager matriser for inngangsparameterne
P <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
Ksat <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
hmaks <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
Phi <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
Kf <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
t_r <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))

for (k in 1:length(locs)) {
  loc <- locs[k]
  scale <- scales[k]
  shape <- shapes[k]
  P[, k] <- loc + scale/shape * (1/(-log(runif(n, 0, 1))))^(shape) - 1) # Gev-fordeling av nedbør
  #P[, k] <- nedbor[k]

  hmaks[, k] <- ((runif(n, 0, 1)+runif(n, 0, 1))/2)*(hmaks_maks-hmaks_min)+hmaks_min # Trekantfordeling hmaks
  #hmaks[, k] <- 20

  Kf[, k] <- (runif(n, 0, 1))*(Kf_b-Kf_a)+Kf_a # Uniformfordeling Kf
  #Kf[, k] <- 1.3

  Phi[, k] <- ((runif(n, 0, 1)+runif(n, 0, 1))/2)*(Phi_b[k]-Phi_a[k])+Phi_a[k] # Trekantfordeling av avrenningskoeffisient
  #Phi <- 0.9

  Ksat[, k] <- rlnorm(n, log(Ksat_median), Ksat_std) # Lognormalfordelt Ksat
  #Ksat[, k] <- 20.2

  t_r[, k] <- tr[k] # Nedbørvarighet
}

f_alle <- (Phi*P*0.001*Kf)/((hmaks*0.01)+(Ksat*0.01/60)*t_r) # Beregning av regnbedareal for alle
# varigheter (tr)
# Maksimal regnbedareal fra hver simulering

f_max <- apply(f_alle, 1, max)

# Persentiler av fordeling
f_max_P5 <- quantile(f_max, .05)
f_max_P95 <- quantile(f_max, .95)

print(f_max_P5)
print(f_max_P95)
print(f_max_P95-f_max_P5)

# Plotter verdiene for regnbed
plot(density(f_max),
     xlab = "f [-]",
     ylab = "Sannsynlighetstetthet",
     xlim = c(0,0.3),
     ylim = c(0,50),
     cex.axis = 0.9,
     cex.lab = 1
)

lines(density(f_max), col = 2)
lines(density(f_max), col = 3)
lines(density(f_max), col = 4)
lines(density(f_max), col = 7)
lines(density(f_max), col = 6)

legend("topright",
      c("Alle ukjent", "Kjent φ", "Kjent Kf", "Kjent P", "Kjent hmaks", "Kjent Ksat"),
      col = c(1,2,3,4,7,6),
      lty = 1,
      cex = 0.7
)
```

Vedlegg C: Kode for Monte Carlo av kostnader for regnbed

```
# Definerer parameterne for GEV-fordeling av nedbør
locs <- c(4.67, 6.83, 9.24, 10.80, 12.48, 13.92, 15.99, 17.82, 20.71, 25.63, 31.24, 38.09)
scales <- c(0.36, 0.49, 0.73, 0.85, 0.90, 1.06, 1.15, 1.35, 1.37, 1.66, 1.64, 1.74)
shapes <- c(-0.29, -0.20, -0.12, -0.12, -0.13, -0.15, -0.18, -0.21, -0.18, -0.34, -0.36, -0.25)

# Definerer nedbørvarighetene
tr <- c(5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 360, 720, 1440)
nedbor <- c(4.80, 7.00, 9.50, 11.10, 12.80, 14.30, 16.40, 18.30, 21.20, 26.20, 31.80, 38.70)

# Definerer inputverdiene for hydraulisk konduktivitet
Ksat_median <- 34.3889
Ksat_std <- 1.0449

# Definerer inputverdiene for avrenningskoeffisient
Phi_a <- c(0.1, 0.2, 0.5, 0.5, 0.7, 0.7, 0.7, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.7)
Phi_b <- c(1.8, 1.2, 1.1, 1.1, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.3, 1.2, 1.2, 1.2)

# Definerer inputverdiene for maksimal vannstand
hmaks_min = 6.5
hmaks_maks = 35

# Definerer inputverdiene for klimafaktor
Kf_a = 1.2
Kf_b = 1.4

n <- 1000000 # Antall simuleringer
# Lager matriser for inngangsparameterne
P <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
Ksat <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
hmaks <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
Phi <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
Kf <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))
t_r <- matrix(0, nrow = n, ncol = length(locs))

for (k in 1:length(locs)) {
  loc <- locs[k]
  scale <- scales[k]
  shape <- shapes[k]
  P[, k] <- loc + scale/shape * (1/(-log(runif(n, 0, 1)))^shape) - 1 # Gev-fordeling av nedbør
  #P[, k] <- nedbor[k]

  hmaks[, k] <- ((runif(n, 0, 1)+runif(n, 0, 1))/2)*(hmaks_maks-hmaks_min)+hmaks_min # Trekantfordeling hmaks
  #hmaks[, k] <- 20 # Median av hmaks

  Kf[, k] <- (runif(n, 0, 1))*(Kf_b-Kf_a)+Kf_a # Uniformfordeling Kf
  #Kf[, k] <- 1.3 # Median av Kf

  Phi[, k] <- ((runif(n, 0, 1)+runif(n, 0, 1))/2)*(Phi_b[k]-Phi_a[k])+Phi_a[k] # Trekantfordeling av avrenningskoeffisient
  #Phi <- 0.9 # Median av avrenningskoeffisient

  Ksat[, k] <- rlnorm(n, log(Ksat_median), Ksat_std) # Lognormalfordelt Ksat
  #Ksat[, k] <- 20.2 # Median av Ksat

  t_r[, k] <- tr[k] # Nedbørvarighet
}

f_alle <- (Phi*P*0.001*Kf)/((hmaks*0.01)+(Ksat*0.01/60)*t_r) # Beregning av regnbedareal for alle
# varigheter (tr)
# Maksimal regnbedareal fra hver simulering

# Definerer inputverdier for etableringskostnad
Ie_median <- 4252.8
Ie_std <- 0.86

# Definerer inputverdier for driftskostnad
dr_median <- 202.2
dr_std <- 104.7
alfa_dr <- (dr_median^2)/(dr_std^2)
beta_dr <- (dr_median)/(dr_std^2)

# Definerer inputverdier for diskonteringsrente
r_median <- 4
r_std <- 3
alfa_r <- (r_median^2)/(r_std^2)
beta_r <- (r_median)/(r_std^2)

Ie <- rlnorm(n, log(Ie_median), Ie_std) # Lognormalfordeling av etableringskostnad
#Ie <- 2568

dr <- rgamma(n, alfa_dr, beta_dr) # Gammafordeling av driftskostnad
#dr <- 165

r <- rgamma(n, alfa_r, beta_r) # Gammafordeling av diskonteringsrente
#r <- 4

R <- (((1+r/100)^40)-1)/(r/100*((1+r/100)^40)) # Nåverdifaktor for alle gammafordelte
# diskonteringsrentene for 40 år.
```

```

dr_tot <- dr*R
NPV <- (f_max*(Ie+dr_tot))/100

# 5% og 95% persentiler av nåverdikostnad
NPV_P5 <- quantile(NPV, .05)
NPV_P95 <- quantile(NPV, .95)

print(NPV_P5)
print(NPV_P95)
print(NPV_P95-NPV_P5)

plot(density(NPV),
      xlab = "K_tot [MNOK/ha]",
      ylab = "Sannsynlighetstetthet",
      xlim = c(0,35),
      ylim = c(0,0.23),
      cex.axis = 0.9,
      cex.lab = 1
)

lines(density(NPV), col = 2)
lines(density(NPV), col = 3)
lines(density(NPV), col = 4)
lines(density(NPV), col = 7)
lines(density(NPV), col = 6)
lines(density(NPV), col = 8)
lines(density(NPV), col = 5)
lines(density(NPV), col = 9)

legend("topright",
      c("Alle ukjent", "Kjent  $\phi$ ", "Kjent Kf", "Kjent P", "kjent hmaks", "Kjent Ksat", "Kjent Ke", "Kjent Kdr", "Kjent r"),
      col = c(1,2,3,4,7,6,8,5,9),
      lty = 1,
      cex = 0.6
)

```

Vedlegg D: Inputdata for avrenningskoeffisient

Varighet [min]	Minimumsverdi [-]	Maksimumsverdi [-]
5	0,1	1,8
10	0,2	1,2
20	0,5	1,1
30	0,5	1,1
45	0,7	1,2
60	0,7	1,2
90	0,7	1,2
120	0,8	1,2
180	0,8	1,3
360	0,8	1,2
720	0,8	1,2
1440	0,7	1,2

Vedlegg E: IVF-statistikk fra Blinderen Plu

Gjentaksintervall (år)	Persentiler	5	10	20	30	45	60	90	120	180	360	720	1440
2	2,5	4,1	6,1	8,2	9,6	11,2	12,4	14,3	15,8	18,7	22,9	28,5	35,4
2	50	4,8	7	9,5	11,1	12,8	14,3	16,4	18,3	21,2	26,2	31,8	38,7
2	97,5	5,5	8,1	11,4	13,3	15,1	16,9	19,1	21,3	24,4	29,1	34,6	42,3
5	2,5	5,9	9	12,3	14,2	16,5	17,9	20,5	22,4	25,8	31,5	36,9	44,7
5	50	6,9	10,3	14,4	16,7	19,2	21,2	23,8	26,1	29,6	35,7	41,7	49,3
5	97,5	8,1	12,3	17,8	20,5	23,6	25,5	28,9	30,7	34,9	41,1	47,5	55,2
10	2,5	7,1	10,8	15,3	17,6	20,1	22,2	24,9	26,8	30,6	36,6	42,7	50,7
10	50	8,4	12,7	18,1	21,1	24,3	26,6	29,4	32	35,7	42,2	48,6	56,9
10	97,5	10,3	15,9	22,5	27,1	31	33,4	37,2	39,2	43,5	50,7	58,1	66,4
20	2,5	8,2	12,5	18	20,9	24,1	26,4	29,3	31,3	35,2	41,3	47,9	56,3
20	50	10	15,1	22,1	25,8	29,7	32,6	35,6	38,2	41,8	48,6	56	64,4
20	97,5	12,9	20,2	28,8	34,5	39,9	43,7	47,2	49,5	54,1	62,4	70,7	79,6
25	2,5	8,5	13,1	18,8	22	25,4	27,7	30,7	32,8	36,7	42,7	49,6	57,9
25	50	10,5	15,9	23,4	27,4	31,5	34,6	37,6	40,2	43,8	50,8	58,5	66,9
25	97,5	13,8	21,5	31,3	37,6	43,2	47,6	51,2	53,3	58,3	66,4	75,8	85
50	2,5	9,7	14,6	21,7	25,2	29,6	32	34,8	36,8	40,9	47	54,5	62,8
50	50	12,2	18,4	27,8	32,6	38	41,7	44,3	46,9	50,5	57,4	66,1	74,7
50	97,5	17,2	26,9	40,2	47,8	55,4	60,7	64,3	66,8	72,5	80,7	93,3	102,7

Vedlegg F: Data for hydraulisk konduktivitet og maksimal vannstand

K_{sat} [cm/t]	h_{maks} [cm]
46,6	
70,5	
17,3	25
14,1	35
20,2	25
52,3	25
15,7	25
22,4	25
30,7	25
25	25
33,1	25
5,7	
50,8	20
40,3	15
4,5	20
7,2	6,5
26	20
3	16
19,3	
35,4	
4,9	
17,7	
245,1	10
19,1	
40,2	
63,1	20
62,9	
14,4	20
42,3	20
4,4	10
13,3	10
1,7	10
12,6	33

Vedlegg F: Etablerte regnbed i Oslo

Steder med etablerte regnbed

Maridalsveien ved AHO
Schweigaards gate 31
Selma Ellefsens vei 11
Ruseløkkveien 26
Cort Adellers gate
Ruseløkk skole
Voksen skole
Holmen skole
Nøklevann skole
Deichmans gate
Bjørvika
Sundtkvartalet
Lakkegata – Vahls gate
Olaf Ryes plass
Thorvald Meyers gate
Stålverkskroken ved Gladengveien
Vålerenga stadion
Haslevangen 16
Hasle pocketpark
Skippergata
Vollebekk skole
Vollebekk leiligheter
Verdensparken
Jesperudjordet bak Stovner senter
Rudolf Nilsens plass, Vahls gate 9

Vedlegg G: Data for etableringskostnad ved regnbed

Kilde	Enhetskostnad for etablering [NOK/m ²]
Prosjekt for Bymiljøetaten	12 059
Paus og Egeberg (2020)	2 046
Paus og Egeberg (2020)	2 568
Paus og Egeberg (2020)	3 237
Paus og Egeberg (2020)	1 183
Paus og Egeberg (2020)	1 788
Paus og Egeberg (2020)	4 532
Prosjekt utført av Veidekke Bygg	1 350
Prosjekt utført av Veidekke Bygg	950

Vedlegg H: Data for driftskostnad ved regnbed

Kilde	Enhetskostnad for drift [NOK/m ² · år]
Hageform AS	80
SL Stenlegging AS	80
Hageform AS	150
Uteanlegg AS	150
Akershusgartneren AS	150
Veidekke Bygg	180
Akershusgartneren AS	200
Veidekke Bygg	250
SL Stenlegging AS	300
Bym-prosjekt	482





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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway