



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi

Modellering av grønt tak med mengdekontroll ved hjelp av SWMM Casestudie Vega Scene

Modeling green roof with discharge control
using SWMM – Case study Vega Scene

Ingrid Aas Myhr
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne oppgaven er skrevet våren 2021 som en avslutning av min mastergrad i Vann- og miljøteknikk, med fordypning i overvann, ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet(NMBU). Oppgaven omfatter 30 studiepoeng, og tar for seg utviklingen av en hydraulisk overvannsmodell i SWMM for blågrønne tak. Målet har vært å finne ut hvilke konseptuelt ulike modelloppbygninger som kan brukes til å beskrive slike tak i SWMM, i hvilken grad modellene etter kalibrering greier å gjengi observert videreført vannmengde og hvordan erfaringer som gjøres i dette prosjektet er overførbare til lignende tak i fremtiden.

Først og fremst vil jeg takke hovedveileder Kim Haukeland Paus fra NMBU for konstruktive tilbakemeldinger og god hjelp med modellen. Knut Magne Møen i NVE har stilt med nødvendig måledata og Rune Skeie i Asplan Viak og Bjørn Nordseth i PRO-TAN har bidratt med tegninger, mål og dimensjoner for taket på Vega Scene. Sammen med biveileder Vegar Nilsen fortjener også disse en takk.

Etter til sammen seks år i Ås vil jeg også rette en stor takk til alle som har bidratt til å gjøre min studiehverdag unik og fin. Røyene i Pikekoret IVAR, gledessprederne i klatre- og friluftslivgruppa, og gode venner som alltid stiller opp. For ikke å glemme min tålmodige og støttende kjæreste, som jeg har delt hjemmekontor, frustrasjon og glede over denne oppgaven med det siste halve året. Dere har alle bidratt til å gjøre min tid her i Ås minneverdig.

Ås, mai 2021
Ingrid Aas Myhr

Sammendrag

Historisk sett har man i Norge håndtert overvann i byer ved å lede det ned i sluk til rørsystemer. Klimaendringene vil føre til flere og kraftigere regnbyger, og kapasiteten til ledningsnettene vil overskrides. Dette vil forårsake skader på miljø og infrastruktur til store summer hvert år. Som et alternativ til utbygging og oppdimensjonering av det eksisterende ledningsnett kan tiltak som fordrøyer vannet lokalt implementeres. Blågrønne tak er vegeterte tak med mengdekontroll, som tillater tilbakeholdelse av store mengder nedbør. Med tilstrekkelig kunnskap om tiltakets funksjon og evne til å fordrøye kan blågrønne tak være fremtidsrettede overvannsløsninger med stort potensiale.

Et viktig steg i denne kunnskapsprosessen er utviklingen av hydrauliske modeller, som beskriver sammenhengen mellom nedbør og avrenning, og dermed hvor mye og hvor lenge vann kan holdes tilbake på taket. Forutsetningene for en god modell er først og fremst gode grunnlagsdata. For at resultatene skal være pålitelige er det også essensielt at modellen kalibreres med hensyn til nedbør-avrenning.

Til denne oppgaven er det blågrønne taket på Vega Scene i Oslo brukt som utgangspunkt for en hydraulisk overvannsmoell i SWMM. Taket består av et grønt toppdekke, som har som oppgave å infiltrere og fordampe hverdagslige regn. I tillegg har taket et magasinerende sjikt, som kombinert med strupede utløp gjør at det har kapasitet til å holde tilbake vann. NVE har utstyrt taket med ulike måleinstrumenter. Nedbørmålingene ble brukt som input i modellene og vannføringsdataene ble benyttet til kalibrering. Det finnes ingen opplagt måte å modellere blågrønne tak på i SWMM, og flere modelloppsett ble derfor testet ut. Rekkefølgen på komponenter i modellen og inkludering av programmets LID-modul viste seg å ha stor innvirkning på resultatene. Kritiske parametere for kalibreringsprosessen var tykkelsen på jordlaget, overflateruhet og gropmagasinering. Modellresultatene viste at det blågrønne taket hadde en gjennomsnittlig retensjonsevne på 34%. Ved en dimensjonerende hendelse med gjentakintervall 20 år ble spissavrenningen redusert med 95% sammenlignet med et tradisjonelt svart tak.

For fremtidig arbeid foreslås det blant annet å etterprøve modellen for lignende tak og høyere nedbørintensiteter.

Summary

Storm water in Norwegian cities has historically been led to pipes and drainage systems. Climate change will cause an increase in precipitation, both regarding amount and intensity. The capacity of the pipes will hence be exceeded, and environmental and infrastructural damages may end up costing the society several billions every year. As an alternative to upgrading the existing systems, initiatives that arrange for local retention of rainwater can be implemented. Blue-green roofs are vegetated roofs with discharge control and can serve as such initiatives. With sufficient knowledge about their functionality they can be solutions with great potential in the future.

The development of hydraulic models which describe the relationship between rainwater and run-off is an important step in this process of acquiring knowledge. Prerequisite for a good model is basic data of high quality, and calibration of the model with regard to rainwater - run-off is essential.

The hydraulic stormwater model in SWMM is based on the blue-green roof on the top of Vega Scene in Oslo. The roof consists of a vegetated top layer with a storage layer underneath. Combined with regulated outlets, the storage layer has the capacity to retain high volumes of water. The Norwegian Water Resources and Energy Directorate has provided the roof with measuring instruments. The measured precipitation was used as input in the model, and the discharge flow was utilized for calibration. There are no evident and builtin methods to model blue-green roofs in SWMM, and different designs and set-ups were therefore examined and evaluated. The consecutive sequence of components in the model and the application of the program's LID-module had a considerable impact on the results. Parameters critical for the calibration process were the thickness of the soil layer, surface roughness and the depth of depression storage.

The simulations resulted in an average retention of 34% for the blue-green roof. Compared to a traditional black roof, the maximum flow was reduced by 95% when simulating a rainfall with a return period of 20 years.

Suggestions for further work include verifying the model for similar roofs and higher rainfall intensities.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
Innhold	vii
Figurer	ix
Tabeller	xi
Forkortelser	xiii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn for problemstilling	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Forskningsspørsmål	2
1.4 Oppgavens oppbygning	2
2 Bakgrunn	3
2.1 Urbanhydrologi	3
2.2 Beregning av fordrøyningssegenskaper	5
2.3 Historiske og fremtidige regn	8
2.4 Modeller for beregning av overvann	9
2.5 Kalibrering og verifisering	10
3 Metode	13
3.1 Studieområde	13
3.2 Hydraulisk modell i SWMM	16
3.2.1 Fire alternative modeller	17
3.2.2 Parametere og kurver	19
3.3 Målinger fra NVE	22
3.3.1 Oppdeling av data	24
3.4 Kalibrering og verifisering	26
3.4.1 Kalibrering	26
3.4.2 Sensitivitetsanalyse	27

3.4.3	Verifisering	28
3.5	Historiske og fremtidige regn	28
4	Resultater og diskusjon	31
4.1	Måledata fra NVE	31
4.2	Modell	32
4.2.1	Langtidsnedbør	32
4.2.2	Enkelthendelser	37
4.2.3	Sensitivitetsanalyse	38
4.2.4	Kalibrering	38
4.2.5	Verifisering	40
4.3	Historiske og fremtidige regn	42
4.3.1	Historiske regn	42
4.3.2	Fremtidige regn	43
4.4	Usikkerhet	44
4.5	Overførbarhet til lignende prosjekter	46
5	Konklusjon	47
5.1	Konklusjon	47
5.2	Videre arbeid	48
	Referanser	49

Figurer

2.1	Avrenningskurver fra naturlige og urbane felt	4
2.2	Tre-trinnsstrategien	5
2.3	Beskrivelse av utløpene	8
2.4	IVF-kurve for Blindern Målestasjon	9
3.1	Dronefoto tatt av taket på Vega Scene	13
3.2	3D-modell av taket	15
3.3	Flytskjema	16
3.4	Oppbygning av de fire alternative modellene	17
3.5	Vannstand på taket	20
3.6	Lagringskurve og vannføringskurve for de to takene	20
3.7	Akkumulert nedbørmengde i de ti målerne	24
3.8	IV-kurver for de største hendelsene	26
3.9	Symmetrisk blokkhyetogram for et 20 års regn med og uten klimafaktor	28
4.1	Nedbør sammenlignet med normalår	31
4.2	Akkumulert nedbør og vannføring fordelt på årets tolv måneder	32
4.3	Månedlig avrenningsmengde for de fire modellene	33
4.4	Sensitivitetsanalyse langtidssimulering	34
4.5	Månedlig avrenningsmengde etter kalibrering	35
4.6	Eksempel på avrenningskurve	36
4.7	Maksimal og total avrenning i Modell 1 og 3 med initialverdier	37
4.8	Hendelser før kalibrering	37
4.9	Sensitivitetsanalyse enkelthendelser	38
4.10	Hendelser etter kalibrering	40
4.11	Verifiserte hendelser sammenlignet med observerte verdier	41
4.12	Avrenningskurver for fremtidens 20 års regn	43

Tabeller

2.1	Avrenningskoeffisienter for små felt	4
3.1	Parametere som er felles for alle modellene.	21
3.2	Unike parameterverdier for Modell 1 og 3	22
3.3	Unike parameterverdier for Modell 2 og 4	22
3.4	LID-parametere til Modell 2, 3 og 4	23
3.5	De åtte største regnhendelsene	25
3.6	Kalibreringsparameterere aktuelle for Modell 1 og 3	27
3.7	Kalibreringsparameterere aktuelle for Modell 2 og 4	27
4.1	Årlig avrenningsmengde for de fire modellene	33
4.2	Volumfaktor for de ulike modellene med initialverdier	34
4.3	Volumfaktor etter kalibrering - langtidssimulering	36
4.4	Volumfaktor og NSE før kalibrering - enkelthendelser	39
4.5	Volumfaktor og NSE etter kalibrering - enkelthendelser	39
4.6	Volumfaktor og NSE - verifisering	41
4.7	Nedbør, avrenning og avrenningskoeffisienter for historiske regnserier	42
4.8	Maksimal og total vannføring for fremtidig 20 års regn	43
4.9	Avrenning, intensitet og avrenningskoeffisienter for 20-årshendelsen	44

Forkortelser

BREEM	Building Research Establishment Environment Assessment Method
EPA	United States Environmental Protection Agency
LECA	Light Expanded Clay Aggregate
LID	Low impact development practices
LOD	Lokal overvannsdiskonering
NIBIO	Norsk institutt for bioøkonomi
NSE	Nash and Sutcliffe Efficiency
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
SSB	Statistisk sentralbyrå
SWMM	Storm Water Management Model

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn for problemstilling

Klimaet er i endring og årsnedbøren i Norge forventes å øke frem mot århundreskiftet(Iversen, 2005). Antall episoder med styrtregn vil bli flere og kraftigere. Samtidig blir byene større og tettere, og det som tidligere var grønne, naturlige områder hvor vannet kunne infiltrere i grunnen byttes nå ut med leilighetsbygg, asfalterte veier og andre tette flater. Historisk sett har man i Norge håndtert overvann ved å lede det ned i sluk til rørsystemer, men ledningsnett for spill- og avløpsvann er ikke dimensjonert for å håndtere fremtidens vannmengder(Lindholm mfl., 2008). Dette resulterer i store skader på både omgivelser og miljø, og ifølge Miljødirektoratet ødelegges verdier for 1,6 - 3,6 milliarder kroner årlig som følge av overvann i Norge(Skaaraas mfl., 2015).

På grunn av den manglende kapasiteten er det mange kommuner som nå setter krav til hvor mye vann som kan tilføres det offentlige avløpssystemet. Oslos veileder for overvann oppgir grenseverdier for påslipp til kommunalt separat- og fellessystem. For en tomt med areal på 1000m² ligger disse verdiene eksempelvis på 3,5 og 1,0 l/s(Oslo kommune, 2017). Som et alternativ til utbygging av ledningsnett har tiltak som fokuserer på å håndtere overvannet lokalt, i åpne naturbaserte løsninger, vokst frem. Disse tiltakene sørger på ulike måter for at overvannet infiltreres, forsinkes og holdes tilbake slik at det eksisterende nettet ikke overbelastes. I tette bymiljø er det ofte komplisert og kostbart å anlegge tiltak på bakkenivå, og etablering av løsninger på byggenes tak kan derfor være et godt alternativ.

For å implementere og dra nytte av disse løsningene mest mulig effektivt er det viktig med tilstrekkelig og dokumentert kunnskap om hvordan de fungerer. På den måten kan utformingen og dimensjoneringen optimaliseres. Taket på Vega Scene er utformet som et stort blågrønt tak og er det første av sitt slag per dags dato. Erfaringer som gjøres her kan bli viktige for planlegging og benyttelse av nye slike tak i fremtiden.

1.2 Problemstilling

Formålet med denne oppgaven har vært å utvikle en hydraulisk modell i SWMM som beskriver videreført vannmengde på det blågrønne taket på Vega Scene mest mulig nøyaktig. Flere alternative modeller ble testet ut og sammenlignet med faktiske målinger. Ved hjelp av analyseverktøy har det vært mulig å finne ut av hvilke parametere som har størst innvirkning på takets fordrøyende egenskaper. Målet har vært at erfaringsverdier fra dette studiet skal kunne benyttes i utforming av fremtidige blågrønne tak.

Norges vassdrags- og energidirektorat(NVE) har utstyrt taket med ulike måleinstrumenter, og har siden takets ferdigstilling samlet inn data for blant annet nedbør, temperatur, vannføring og vannstand på taket. Det har blitt utført statistiske analyser av de målte verdiene for nedbør og videreført vannmengde. Disse verdiene har også blitt benyttet til kalibrering og verifisering av modell.

1.3 Forskningsspørsmål

Problemstillingen blir besvart ved hjelp av tre forskningsspørsmål som følger:

1. Hvilke konseptuelt ulike modell-opbygninger kan brukes til å beskrive blågrønne tak i SWMM?
2. I hvilken grad evner modellene etter kalibrering å gjengi observert videreført vannmengde over året og for enkeltstående hendelser?
3. Hvordan kan det genereres erfaringsverdier fra Vega Scene som kan benyttes ved fremtidig dimensjonering av blågrønne tak?

1.4 Oppgavens oppbygning

Kapittel 1 presenterer problemstilling og forskningsspørsmål. Kapittel 2 legger frem nødvendig teori og beregningsgrunnlag for forståelse og besvarelse av disse spørsmålene. Kapittel 3 gir en oversikt over det aktuelle området og en innføring i SWMM, samt en beskrivelse av de ulike modellalternativene. Dette leder så til kapittel 4 hvor resultatene blir presentert og diskutert. Parameterenes sensitivitet testes og modellene kvalitetssikres. Til slutt blir svarene på forskningsspørsmålene lagt frem, hovedkonklusjoner trukket og forslag til videre arbeid presentert.

2. Bakgrunn

2.1 Urbanhydrologi

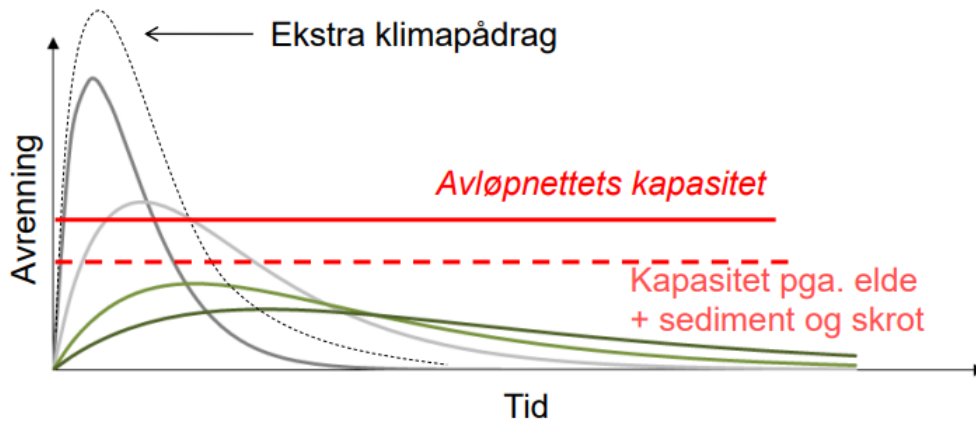
Prognoser utført av Statistisk sentralbyrå(SSB) antyder at Oslo og andre store byer på sør- og vestlandet vil oppleve den høyeste befolkningsveksten frem mot 2040(Skaaraas mfl., 2015). Fagrådet for bærekraftig bypolitikk konkluderte også i sin rapport med at det beste for fremtiden vil være å fortsette utbygging i allerede eksisterende byer(Miljøverndepartementet, 2013). Ved urbanisering øker andelen tette flater og infiltrasjonsmulighetene i grunnen reduseres. Våtmarksområder bygges ned og bekker legges i rør. Andre hydrologiske effekter av urbanisering er redusert fordampning og senket grunnvannstand(Bøyum mfl., 1997). Sammen med økt nedbør bidrar dette til at den totale overvannsavrenningen øker betraktelig.

Vannføringskurver og avrenningskoeffisienter

Som en konsekvens av en regnhendelse oppstår en vannføring. Utviklingskurven til denne vannføringen kalles et hydrogram(Lindholm, 2018). Formen og størrelsen på kurven avhenger sterkt av egenskapene til overflatene som regnet treffer. I naturlige områder vil vannet kunne infiltrere, fordampe og holdes tilbake. Dette gjør at vannføringskurvene blir flate og slake. I byer med en stor andel impermeable flater vil store nedbørhendelser føre til brattere kurver og høye avrenningstopper. Figur 2.1 viser avrenningstopper sett i forhold til ledningsnettets kapasitet. De grønne grafene representerer naturlig avrenning, mens de grå toppene viser avrenning fra urbane felt. Delen av vannføringskurven som ligger over ledningsnettets kapasitetsgrense er den som forårsaker oversvømmede gater og kjellere, og at avløpsvann går urensset i regnoverløp.

Avrenningskoeffisienter angir forholdet mellom avrenningen og nedbøren over samme område. Den avhenger blant annet av overflatens permeabilitet og nedbørens intensitet og varighet(Ødegaard, 2014).

Det skilles mellom volum-avrenningskoeffisienter og spissavrenningskoeffisienter. Volum-avrenningskoeffisienten defineres som volum avrenning delt på volum nedbør, og be-



Figur 2.1: Avrenningskurver fra naturlige og urbane felt sammenlignet med ledningsnettets kapasitet (Braskerud, 2017).

Tabell 2.1: Spissavrenningskoeffisienter for små felt med ufrosset overflate og returperiode 10 år (Statens vegvesen, 2014).

Overflatetype	Spissavrenningskoeffisient
Betong, asfalt, bart fjell o.l.	0,6 - 0,9
Grusveger	0,3 - 0,7
Dyrket mark og parkområder	0,2 - 0,4
Skogsområder	0,2 - 0,5

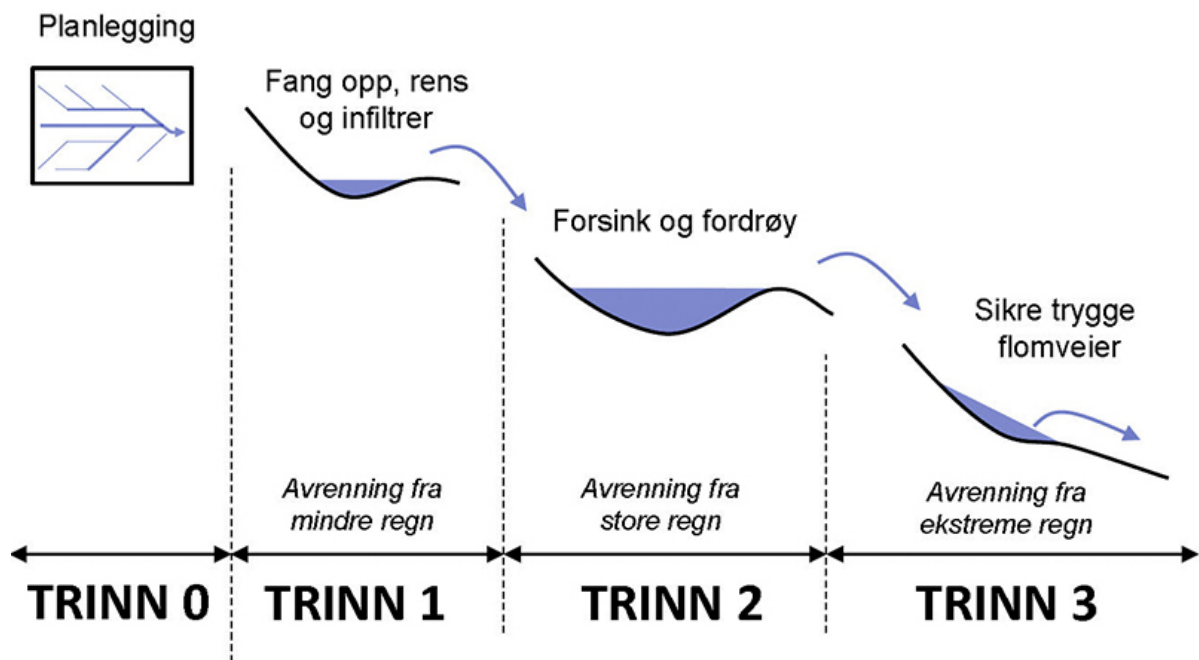
nyttes ved dimensjonering av tiltak som skal håndtere overvann ved lengre regnhendelser. Denne kan kobles direkte opp mot tiltakets retensjonsevne (Bøyum mfl., 1997). Eksempelvis vil en volum-avrenningskoeffisient på 0,7 tilsi at 30% av nedbørvolumet tilbakeholdes i løpet av den tiden beregningene omfatter. Spissavrenningskoeffisienten angir forholdet mellom maksimal avrenning og midlere nedbørintensitet for et gitt område (Statens vegvesen, 2014). Tabell 2.1 viser veiledende spissavrenningsfaktorer for felt med ulik overflate. Disse brukes i hovedsak ved kortvarige nedbørshendelser.

Tre-trinnsstrategien

For å redusere flomtoppene må overvannet i urbane områder håndteres på nye måter. Tre-trinnsstrategien har siden tidlig på 2000-tallet vært anbefalt av Norsk Vann som overordnet strategi for håndtering av overvann. Strategien består, som vist i Figur 2.2, av tre hovedtrinns i tillegg til planleggingsfasen. Trinn 1 innebærer at avrenning fra mindre regn skal infiltreres, fordampes og eventuelt renses. Trinn 2 tar for seg de større regnhendelsene, og uttrykker at disse skal fordrøyes lokalt før utløp på offentlig nett. Det siste trinnet omfatter at vann trygt skal kunne ledes til flomveier ved svært store nedbørshendelser (Lindholm mfl., 2008). Oslo har, i likhet med flere andre kommuner, tatt tre-trinnsstrategien inn i sin byplanlegging og setter krav til åpen og lokal

overvannshåndtering i byggesaker (Paus og Alne, 2018).

Tre-trinnsstrategien har bidratt til å fremme overvannsløsninger som inngår under det som refereres til som lokal overvannsdiskonering (LOD). Tiltakene kan enten benyttes som et supplement til allerede etablerte rørsystemer eller som selvstendige løsninger. De kan bestå av lukkede, fordrøyende magasiner eller være åpne, naturbaserte løsninger som utnytter vegetasjon, løsmasser og/eller forsenkninger i terrenget til å håndtere nedbør og avrenning (Paus, 2020). Grønne og blågrønne tak er eksempler på tiltak som går under denne kategorien.



Figur 2.2: Tre-trinnsstrategien for håndtering av overvann (Kilde: Norsk Vann).

2.2 Beregning av fordrøyningsegenskaper

Fordrøyningsvolum

Enkelt forklart kan fordrøyningsvolumet V på taket beskrives som differansen mellom regnmengden som treffer taket og vannmengden som renner ut taknedløpene.

$$V = V_{inn} - V_{ut} \quad (2.1)$$

hvor

V = nødvendig fordrøyningsvolum [m^3]

V_{inn} = vannvolumet som tilføres taket via direkte nedbør [m^3]

V_{ut} = vannvolumet som renner av taket gjennom taknedløpene [m^3]

Ved lagring av vann på et tak med løsmasser er det porevolumet i løsmasselaget som bestemmer hvor mye vann som kan holdes tilbake. Nødvendig fordrøyningsvolum avhenger derfor ikke kun av takets areal og vannstand, men også av løsmassenes effektive porøsitet. Det vil si volumet av porer gjennom hvilke vann kan strømme i forhold til totalvolumet (Paradis mfl., 2018).

$$V = A * h * n_{eff} \quad (2.2)$$

hvor

A = takets areal [m^2]

h = vannstand på taket [m]

n_{eff} = effektiv porøsitet i løsmassene ved regnstart [-]

Vannmengde inn

Vannmengden som tilføres taket regnes ut ved hjelp av den rasjonale formel. Selv om den er over 150 år gammel er dette fortsatt den mest utbredte metoden for beregning av avrenning (Thompson, 2006).

$$V_{inn} = \phi * A * P \quad (2.3)$$

hvor

ϕ = midlere avrenningskoeffisient [-]

A = nedbørsfeltets areal [m^2]

P = nedbørmengde [m]

Taket på Vega Scene utgjør i denne oppgaven hele nedslagsfeltet, og avrenningskoeffisienten settes derfor lik 1. Vannmengden som tilføres taket er dermed kun et produkt av nedbørmengden og takets areal. Historiske nedbørmengder kan hentes ut fra målestasjoner og basert på IVF-kurver kan fremtidige regn konstrueres ved hjelp av ulike hyetogrammer. For fremtidige regn ganges vannmengden opp med en klimafaktor, som benyttes for å ivareta den predikerte økningen i nedbør. Statens Vegvesen anbefaler en klimafaktor for installasjoner som har en forventet levetid på 100 år og gjentaksintervall 20 år på ca 1,3-1,4 (Statens vegvesen, 2014).

Vannmengde ut

Vannmengden som renner av takene i løpet av regnhendelsen begrenses av strupeløsningene på taket og varierer med vannstanden. Strupeløsningene er vist i Figur 2.3. For

det store taket beregnes vannføringen Q på følgende måte ut i fra om utløpet er fritt eller dykket (Paus, 2016):

$$Q_{fritt} = C_f * 4 * \sqrt{\frac{2}{3} * g} * \left(\frac{1}{3} * H * h^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{5} * h^{\frac{5}{2}} \right) * n \quad (2.4)$$

$$Q_{dykket} = C_d * \frac{1}{\sqrt{3}} * H^2 * \sqrt{2 * g * h} * n \quad (2.5)$$

Hvor:

Q_{fritt} = vannføring ved fritt utløp [m^3/s]

Q_{dykket} = vannføring ved dykket utløp [m^3/s]

C_f = kontraksjonskoeffisient for fritt utløp [-]

C_d = kontraksjonskoeffisient for dykket utløp [-]

H = høyden på lysåpningen [m]

h = vannstanden på taket [m]

g = gravitasjonskonstanten [m/s^2]

n = antall sluk på taket

For det lille taket er strupeløsningen sirkulær og videreført vannmengde bestemmes ut i fra sammenhengen:

$$Q = C * A * \sqrt{2 * g * h} \quad (2.6)$$

Hvor:

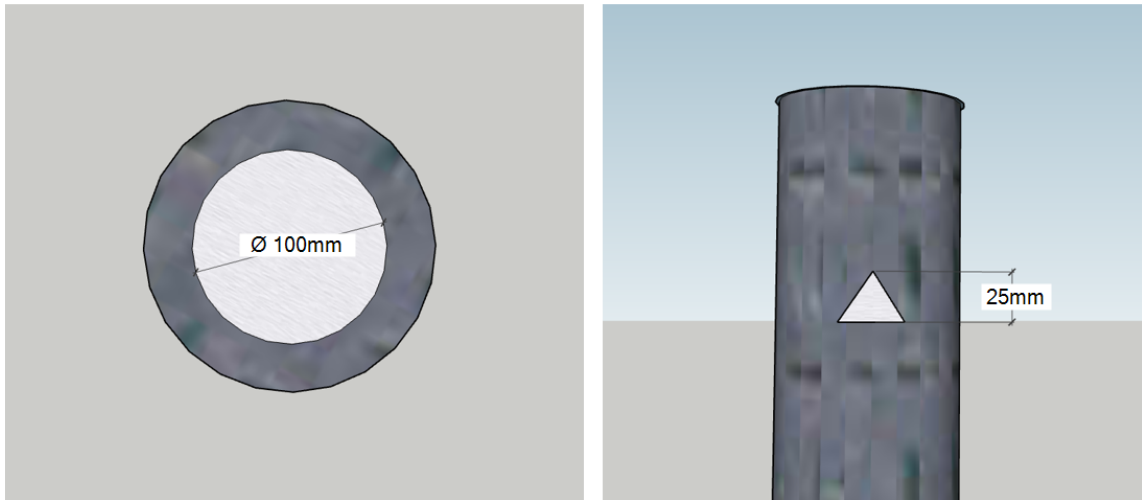
Q = vannføring ut av sluket [m^3/s]

A = tverrsnittsarealet på lysåpningen [m^2]

C = tapskoeffisienten [-]

h = vannstanden på taket [m]

g = gravitasjonskonstanten [m/s^2]

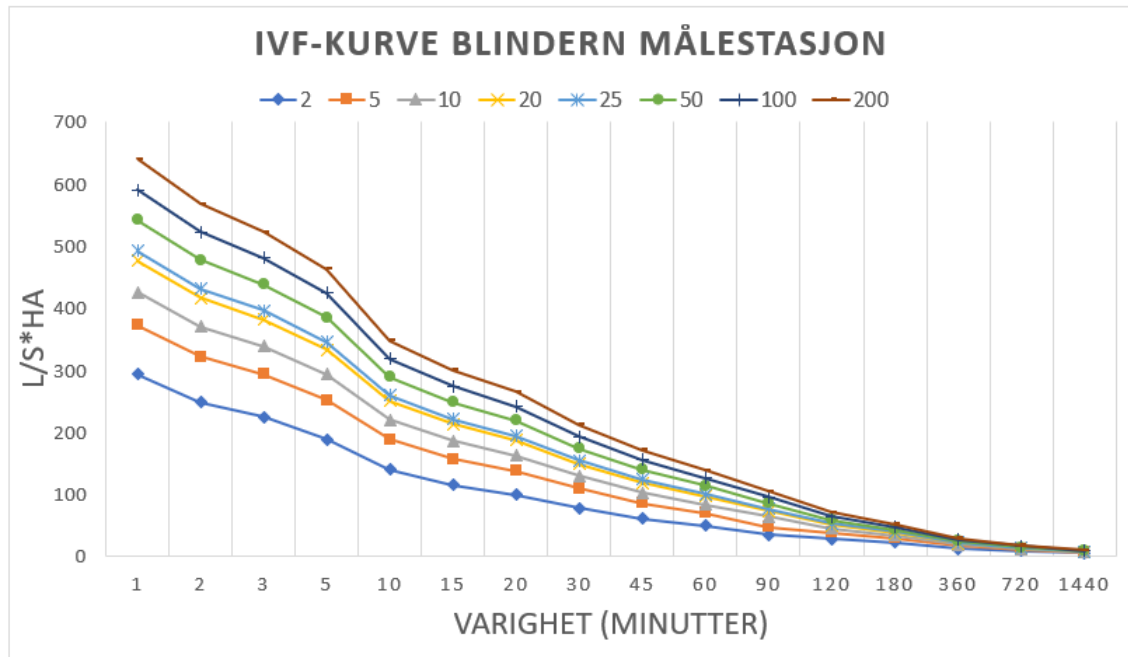


Figur 2.3: Figuren til venstre viser utløpsåpningen på det grønne taket. Slukåpningen er sett ovenfra og har en diameter på 100mm. Til høyre er en beskrivelse av strupeanordningen på det blågrønne taket. Utløpet er sett fra siden, og høyden på trekanten er 25mm.

2.3 Historiske og fremtidige regn

Fra målere og databaser er det mulig å hente ut nedbørverdier for hendelser som allerede har funnet sted. Taket på Vega Scene er selv utstyrt med nedbørmålere, men har kun vært i drift et par år. Målestasjonen på Blindern i Oslo har derimot målinger fra mange år tilbake i tid. For fremtidige regn må det tas utgangspunkt i historiske verdier for konstruksjon av nedbørshendelser. Disse kunstige hendelsene lages ved hjelp av forenklete hyetogrammer, med beregningsprosedyrer av varierende kompleksitet. IVF-kurver og regnvarighet er nødvendig for å konstruere disse hyetogrammene. IVF er en forkortelse for intensitet, varighet og frekvens, og kurvene beskriver nedbørintensiteten for ulike varigheter som kan forventes å komme med en viss hyppighet. Eksempel på IVF-kurver for Blindern målestasjon er vist i Figur 2.4.

Kasseregner antar konstant nedbørintensitet og er enkle å konstruere siden varighet og intensitet kan leses direkte av fra IVF-kurven. Likevel egner de seg best til svært grove beregninger. Et argument for heller å bruke symmetriske blokkhyetogrammer er at de store, dimensjonerende regnene sjelden har konstant intensitet og at den maksimale intensiteten gjerne kommer en viss tid etter regnstart. Denne typen hyetogram antas å være symmetriske om sin midtakse og konstruksjonsprosedyren baserer seg på at regnvolumet innenfor de x mest intensive minuttene skal tilsvare regnvolumet i et kasseregner med varighet x minutter (Ødegaard, 2014). Grunnlaget for beregningene hentes ut fra IVF-kurven, og videre utregninger gjennomføres med et passende beregningssteg.



Figur 2.4: IVF-kurve for Blindern Målestasjon i Oslo basert på nedbørmålinger gjort i perioden 1968-2017. Hver av linjene resresenterer et gitt gjentaksintervall (Norsk klimaservicesenter, 2021).

2.4 Modeller for beregning av overvann

Det eksisterer i dag flere programmer som beregner avrenning, og som kan benyttes til simulering av ulike overvannstiltak. Både utgangspunktet og målet med simuleringen er avgjørende for valg av program. De mest utbredte er MIKE URBAN, HYDRUS-1D, STORM, MOUSE, DRAINS, samt ulike varianter av SWMM og HEC (Haris mfl., 2016). HEC-programmene egner seg godt til simuleringer av større nedbørsfelt med kanaler og flomproblematikk (Brunner og CEIWR-HEC, 2016), mens brukeren har mulighet til å modellere avrenningssituasjoner i tre dimensjoner i MIKE URBAN. HYDRUS-1D spesialiserer seg på vannføringer gjennom porøse medier med ulik metningsgrad (Castiglia Feitosa og Wilkinson, 2016). For modellering av mindre, urbane nedbørsfelt er SWMM utvilsomt den mest dominerende, mye på grunn av at programmet har vært lisensfritt helt siden 1971 (Rossman, 1975, Burszta-Adamiak og Mrowiec, 2013).

Storm Water Management Model (SWMM)

SWMM er et hydrologisk-hydraulisk modelleringsprogram utviklet av United States Environmental Protection Agency (EPA). SWMM-modellen settes opp ved at et eller flere delfelt mottar nedbør og ut i fra nedbørens intensitet og feltets egenskaper genereres avrenning. Ved hjelp av hydraulisk routing transporterer SWMM denne avrenningen inn i et system av rør, kanaler, lagringsobjekter, pumper og regulatorer. Programmet lar brukeren følge kvantitet og kvalitet på avrenningen fra hvert delfelt, og beregner en

rekke andre parametere. Beregningene kan enten gjøres for enkeltstående regnhendelser eller for flere hendelser fordelt over en lengre tidsperiode(Rossman, 1975).

Tidligere studier gjennomført ved bruk av SWMM

Et av de mulige bruksområdene til programmet er modellering av retensjonevne for grønne tak. I tidligere versjoner av SWMM har grønne tak blitt representert som permeable delfelt med tilpassede infiltrasjonsparametere i Green Ampts likning(Palla mfl., 2011). Som et resultat av økende interesse og fokus på overvannshåndtering verden over har en egen modul for enklere inkludering av et utvalg tiltak også blitt integrert i programmet. Nyere studier har vurdert om dette verktøyet egner seg og gir tilstrekkelig gode resultater med tanke på retensjon og simulering av avrenningsforløp. Grønne tak har blitt forsøkt modellert ved hjelp av tiltaket "Green Roof" (Russwurm mfl., 2018, Burszta-Adamiak og Mrowiec, 2013), men tilnærminger ved bruk av "Bio Retention Cell" er også blitt undersøkt(Cipolla mfl., 2016). Blågrønne tak er grønne tak med mengderegulering og et utvidet magasinerende sjikt. Disse studiene vil kunne være til inspirasjon for utforming av denne typen tak, selv om takets utforming og reguleringsmekanismer vil være av større betydning og må tilnærmes på nye måter.

2.5 Kalibrering og verifisering

Modeller er forenklinger av den virkelige verden, og selv med gode datagrunnlag vil de aldri kunne bli helt nøyaktige. For å forsikre at simuleringene og resultatene er pålitelige må modellene derfor kalibreres. Tradisjonell kalibrering innebærer å sammenligne observerte responsegenskaper for et utvalg av individuelle hendelser, og deretter verifisere eller validere de kalibrerte parametrene mot en eller flere uavhengige hendelser. Det viktigste er å sammenligne total vannføring, spissavrenning og formen på hydrogrammet. Historisk sett har det vært vanlig med kalibrering basert på enkelthendelser, men på grunn av raskere datamaskiner og mer tilgjengelig måledata har det blitt mulig å utføre kontinuerlig kalibrering over lengre tidsperioder.

Effektivitetskriterier

Til evaluering av hydrologiske og hydrauliske modeller er det også vanlig å benytte seg av ulike typer effektivitetslikninger som tallfester avviket mellom det observerte og det simulerte. Nash and Sutcliffe Efficiency(NSE) er blant de mest utbredte(Gupta mfl., 2009), men kalibreringsverktøyet i SWMM oppgir også verdier for en rekke andre kriterier(Shamsi og Koran, 2017).

NSE sammenligner den relative størrelsen på residualvariansen med observasjonsvariansen(Nash og Sutcliffe, 1970). Den kvadrerte formen gjør at store avvik straffes hardere

enn små. En NSE-verdi lik 1 tilsier perfekt korrelasjon mellom observerte og simulerte verdier, mens en NSE-verdi < 0 i teorien betyr at gjennomsnittet av de observerte målingene estimerer bedre enn modellen selv.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2} \quad (2.7)$$

hvor

O_i = observert verdi ved tid i

M_i = modellert verdi ved tid i

N = antall tiddsteg

O_{avg} = gjennomsnittet av de observerte verdiene

En av hovedutfordringene med å lage en hydraulisk overvannsmodell er å få tilpasset tregheten i systemet. Det er stor sannsynlighet for at modellen kan stemme godt, men at resultatene er forskjøvet i tid i forhold til observasjonene. Dette vil resultere i lave NSE-verdier, og det er usikkert hvor mye denne verdien totalt sett bør vektlegges.

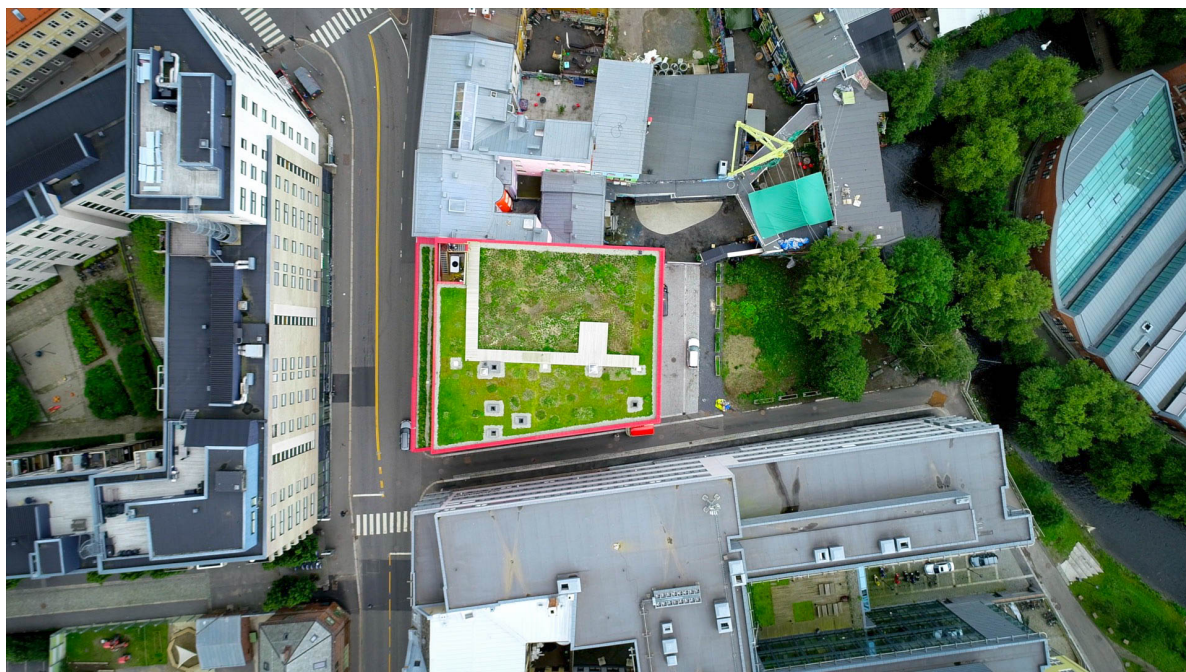
Parameterusikkerhet og sensitivitetsanalyse

Parameterene som skal kalibreres må tildeles en usikkerhet. Usikkerheten bestemmes ut ifra estimater for den omtrentlige øvre og nedre grense for hver enkelt parameter, og middelveien brukes som initialverdi for modellgjennomkjøringene. Grenseverdiene baserer seg enten på litteraturverdier eller settes basert på skjønsmessige vurderinger. Ved å gjennomføre en sensitivitetsanalyse er det mulig å finne ut av hvor følsomme variablene er for endringer (Stavseth, 2020).

3. Metode

3.1 Studieområde

Taket på Vega Scene er et blågrønt tak og det eneste av sitt slag per dags dato. Figur 3.1 viser et bilde av taket sett ovenfra. Det er bygget for å håndtere Trinn 1 og 2 i tre-trinnsstrategien til Norsk Vann. I likhet med grønne tak består taket av et vegetert dekke som har som formål å fange opp, infiltrere og fordampe hverdagslige regn. I tillegg til dette grønne toppdekket har taket et magasinerende sjikt, som har kapasitet til å holde tilbake og fordrøye. Ved å strupe taknedløpet tillates det at det står vann på takpappen. Dette er den "blå" delen av taket. Sammen er disse to lagene dimensjonert for å håndtere fremtidens 20 års regnhendelser(Paus og Alne, 2018). Det vil si en regnhendelse som statistisk sett kommer til å bli overskredet én gang i løpet av 20 år.



Figur 3.1: Dronefoto tatt av taket på Vega Scene(Foto: Asplan Viak).

Utviklingen av taket har vært et samarbeid mellom Urbanium, Asplan Viak, NVE, Protan, Bergknapp og Norsk institutt for bioøkonomi(NIBIO). Bygget mottok i 2019

Oslo bys arkitekturpris, og er dessuten Norges første BREEAM-sertifiserte kulturbygg. BREEAM (Building Research Establishment Environment Assessment Method) er et internasjonalt utviklet verktøy som benyttes til å sertifisere bygninger for sin miljøvennlighet (Cole og Valdebenito, 2013). Både arkitekturprisen og sertifiseringen skyldes først og fremst byggets innovative tak.

Fordeler og ulemper

I tillegg til å holde tilbake vann viser studier at slike tak kan ha en isolerende funksjon, og virke nedkjølende om sommeren (Fang, 2008). Dekket virker også beskyttende på selve konstruksjonen og kan øke takets levetid. En annen fordel er at vegetasjonen danner et viktig habitat for insekter, fugler og andre arter. Taket bidrar dermed til økt biologisk mangfold. Spesielt for Vega Scene er intensjonen om å gjenskape Oslofjordens arts mangfold, og på den måten sørge for at viktige, lokale arter ikke forsvinner. Andre studier indikerer at vegeterte tak kan være å foretrekke fremfor svarte på grunn av evnen til å dempe støy (Van Renterghem og Botteldooren, 2009) og rense luft (Currie og Bass, 2008).

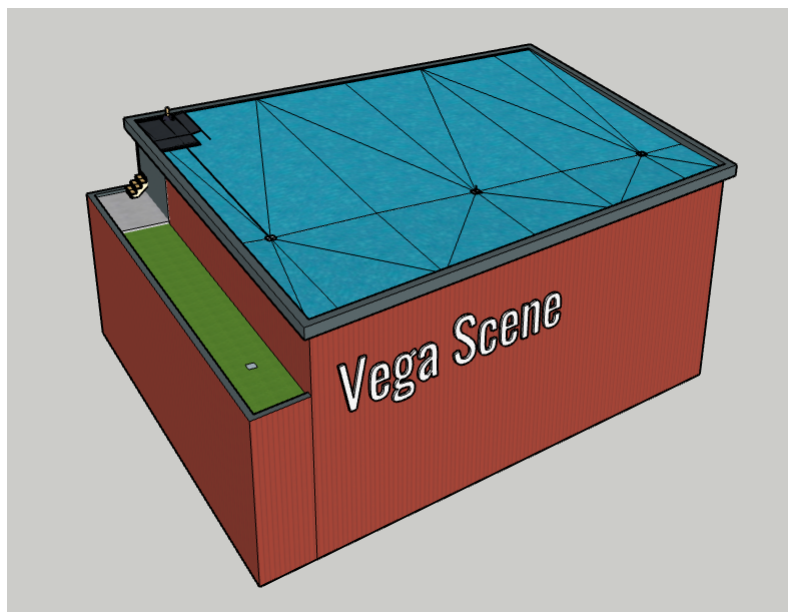
Vannmengdene kan potensielt føre til en betydelig økt taklast, og setter derfor høye krav til konstruksjonens robusthet (Andenæs mfl., 2020). For etablering av slike tak er det dermed viktig å komme tidlig inn i planleggingsfasen og sørge for godt samarbeid med andre fagdisipliner. En annen utfordring med blågrønne tak er risikoen for vannlekkasje gjennom takmembranen, som igjen kan føre til forringelse av isolasjonsmaterialer, korrosjon, elektriske feil og uønsket biologisk vekst (Andenæs mfl., 2018).

Geometri og utforming

Tilsammen er det totale takarealet 801m². Det blågrønne taket måler 692,5m², hvor hele arealet er intensivt med varierende dybde. Mesanintaket i 4. etasje er på totalt 108,5m², hvorav 87,5m² er grønt og resten er sort teknisk areal med blant annet trapp og ventilasjonsaggregat. Figur 3.2 viser en 3D-modell av selve bygget hvor de to takene enkle å identifisere.

Blågrønt tak

Hovedtaket består i prinsippet av to lag, et vegetasjonsdekke med vekstjord og et løsmasselag. Det er delt inn i tre ulike hovedsoner basert på bruksområde. Disse er grunnlendt kalkmark, åpen kalkmark og vegetasjonsdekke/habitat for bier. Tykkelsen på både vekstlaget og løsmasselaget varierer med bruksområde, og totalen spenner fra 150-400mm. Felles for hele taket er hulledekke, isolasjon, Blueproof-membran og fiberduk i bunnen.



Figur 3.2: 3D-modell av taket med riktige mål i Sketchup. Det blågrønne taket er farget blått, mens det grønne taket i 4. etasje er vist i grønt. Begge takene leder avrenning ned til samme utløpspunkt.

Løsmasselaget består av LECA (Light Expanded Clay Aggregate), som er et lett, luftfylt leiremateriale. På grunn av materialeegenskapene høy porøsitet og god gjennomtrengelighet har laget god evne til å lagre og videreføre vannmengder (Leca, 2019). Løsmassenes effektive porøsitet er oppgitt av leverandør til å være mellom 0,45-0,50, men en middelvei er satt til 0,35 for å ta hensyn til at taket kan være vått ved regnstart (Paus og Alne, 2018). Den gjennomsnittlige helningen på taket er 2,5% og fører vannet mot tre sluk som er plassert i takets lavpunkter. Herfra slippes vannet på kommunens offentlige avløpsnett.

For å overholde maksimale utslippskrav og ha mer kontroll over fordrøyningen på taket er de tre slukene strupet. Uten et strupet utløp ville den hydrauliske ledningsevnen til løsmasselaget vært bestemmende for takets fordrøyende kapasitet (Paus og Alne, 2018). Siden denne kan variere med tiden ville fordrøyningsegenskapene til taket bli vanskelige å kontrollere. Som vist i Figur 2.3 er strupeanordningen formet som en trekant med høyde 25mm. Denne utformingen medfører at videreført vannmengde til offentlig avløpsnett øker med vannstanden på taket. Den maksimale vannføringen ut vil oppstå når vannstanden på taket er på sitt høyeste.

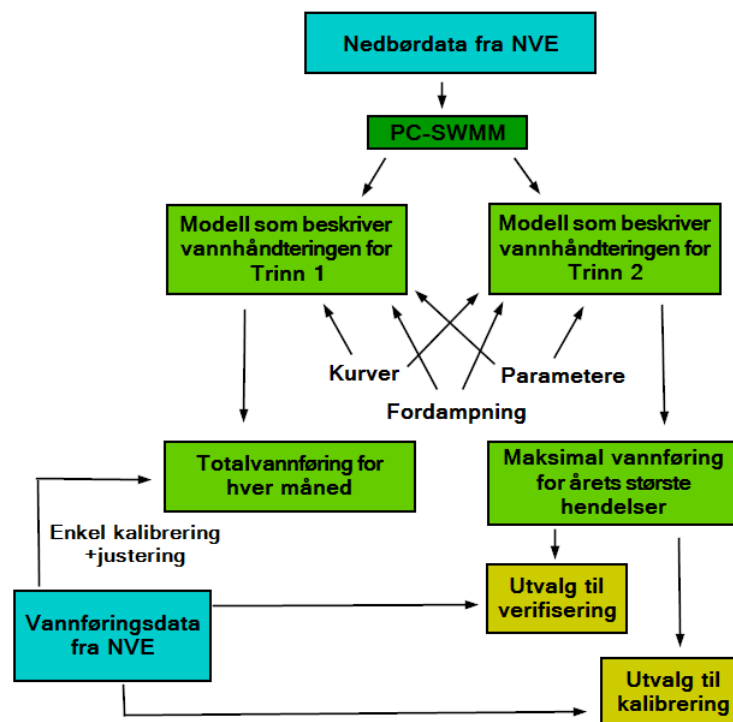
Forsøk på lab med ulike strupeanordninger ble gjennomført av Asplan Viak i 2016, og for en avrundet trekant med høyde 40mm ble kontraksjonskoeffisientene estimert til å være 0,55 og 0,77 for dykket og fritt utløp (Paus, 2016). Disse antas å være like for utløpsarrangementet på taket på Vega Scene.

Grønt tak

Mesanintaket i 4. etasje er utformet som et ekstensivt grønt tak og antas å ha en tykkelse på 100-150mm. Det drenerende laget består av LECA og egenskapene antas å være de samme som for det store taket. Topplaget er dekket med ulike sedumarter. Hydraulisk sett har dette taket mindre kapasitet til å holde igjen vann, og dets hovedoppgave som overvannstiltak er å bidra til fordampning. Vannet vil forsinkes noe, men relativt raskt føres til sluk. Sluket ligger horisontalt og er sirkulært med diameter 100mm. Tapskoeffisienten ved innløpet antas å være 0,6(Vegdirektoratet, 2019).

Selv om det hovedsaklig var fordrøyningsegenskapene til det store blågrønne taket som var målet å modellere i denne oppgaven, måtte mesanintaket også tas med i beregningen. Dette er fordi NVE kun hadde målinger for den samlede viderføringen av vann fra begge takene i sine måledata. Det ville blitt feil i kalibreringen dersom bidraget fra det grønne taket ble neglisjert.

3.2 Hydraulisk modell i SWMM

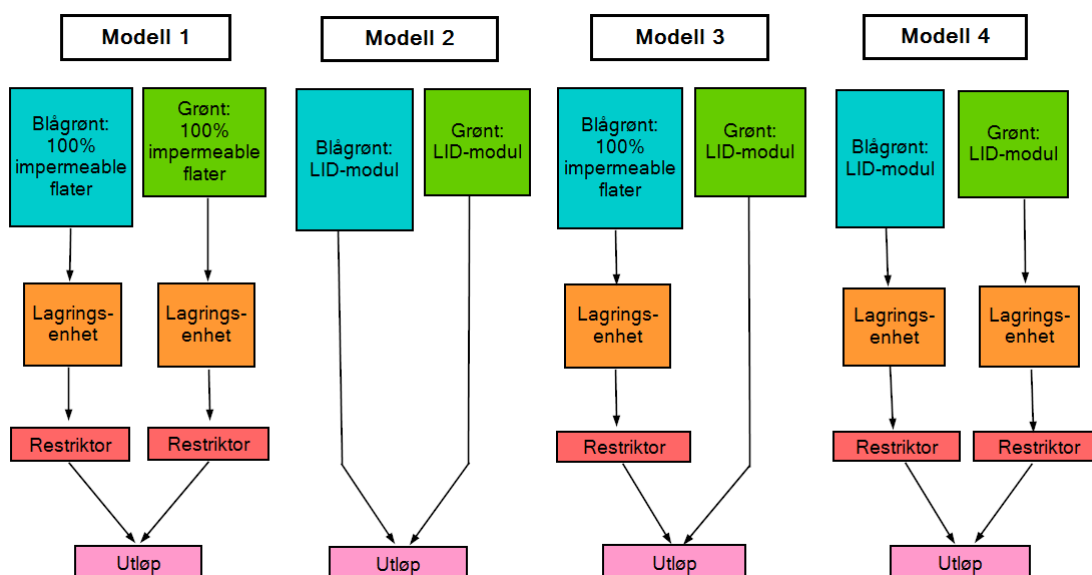


Figur 3.3: Det ble utviklet flere alternative modeller i SWMM. Faktiske regnhendelser og nedbørdata ble brukt som input i modellene. Den/de modellen(e) som genererte de beste resultatene for total vannføring og maksimalavrenning ble kvalitetssikret. Til kalibrering og verifisering ble modellresultatene sammenlignet med vannføringsdata fra NVE.

Modeller i SWMM settes sammen ved hjelp av et utvalg på ti ulike komponenter. Disse

er: delfelt, lagringsenheter, restriktorer, kum-/knekningspunkt, ledninger, utløpsnoder, strømningsdelere, pumper, overløpsnoder og blenderåpninger. I tillegg må hele systemet kobles opp mot en eller flere nedbørshendelser. I modellene for Vega Scene var kun de seks førstnevnte komponentene nødvendige. Antatt rekkefølge på disse, for hver modell, er vist i Figur 3.4. Her representerer delfeltet og lagringsenheten selve taket, restriktoren representerer strupearrangementet i sluket og utløpet er påslippspunktet til offentlig ledningsnett.

I tre av modellene ble SWMMs innebygde LID-modul(Low impact development practices) benyttet. Denne brukes til å modellere LOD-tiltak i nedbørfeltet. Det finnes ingen egen kategori for blågrønne tak, og begge takene ble derfor valgt til å være grønne tak med ekstra tykkelse i modulen. Tiltakene ble lagt inn som en egenskap ved delfeltet. I en simulering utfører programmet en vannbalanse og beregner hvor mye vann som lagres og renner mellom de ulike lagene. Komponentene i denne balansen inkluderer vannmengde inn, infiltrasjon, evapotranspirasjon, avrenning og lagrede volumer(Rossman, 1975).



Figur 3.4: Skjematisk oppbygning av de fire alternative modellene.

Hver av komponentene i modellen måtte tildeles egenskaper, og en stor del av arbeidet med modellbyggingen har gått med til å finne riktige verdier og kurver for disse.

3.2.1 Fire alternative modeller

Det finnes ingen opplagt og innebygd måte å modellere blågrønne tak på i SWMM, og egenskapene og fordrøyningssevnen måtte derfor tilnærmes på andre måter. Det ideelle hadde vært å lage én modell som beskrev taket for alle regn, altså både for Trinn 1 og Trinn 2 i tre-trinnsstrategien. På grunn av forenklinger og begrensninger i programmet

ble det tidlig klart at dette kunne bli vanskelig, og det ble sett på muligheten for å lage to modeller med ulike formål. For å oppnå den/de beste løsningen(e) har fire ulike modellalternativer blitt testet ut. Figur 3.3 viser et flytskjema som beskriver prosessen med oppdeling og kvalitetssikring av modellene, og Figur 3.4 gir en skjematisk oversikt over oppbygningen av de ulike modellalternativene.

Modell 1

I den første modellen ble andelen tette flater på både det blågrønne og det grønne taket satt til 100%. Dermed ville feltene i utgangspunktet ha minimale nedbørtap gjennom for eksempel infiltrasjon og fordampning. Tanken var at regnvolumet som traff taket representerte det totale avrenningsvolumet, og at dette volumet ble ført til hver sin lagringsenhet. Lagringsenheten på det store taket ble regulert av tre strupede utløp som vist i Figur 2.3. Kombinasjonen av tette flater, lagringsenhet og strengt regulerte utløp gjorde at modellen kunne sies å representere et blått tak. Den grønne delen, som skulle sørge for opptak av vann, fordampning og treghet i systemet ble tilnærmet ved å justere parameterene for gropmagasinerings og overflateruhet. Fordelen med denne modellen var at den i stor grad tok hensyn til takenes geometri og utforming. Dette gikk på bekostning av jordmassenes egenskaper, som kun ble representert ved deres effektive porøsitet. Det var knyttet usikkerhet til hvordan modelloppbyggingen påvirket fordampningsberegningen, og modellen ble derfor antatt å være best for større regn.

Modell 2

I den andre modellen ble SWMMs innebygde LID-modul benyttet for å beskrive de to takene. Dette oppsettet åpnet muligheten for å tilnærme tregheten i systemet ved inkludering av infiltrasjonsevne og andre typiske egenskaper ved substratet. Lagringsenheter og restriktorer ble utelatt fra modell, og takets geometri fikk dermed mindre betydning for simuleringsresultatene. Manglende hensyn på takets utforming har blitt pekt på som en av hovedutfordringene ved bruk av denne tilnærmingen i tidligere studier (Burszta-Adamiak og Mrowiec, 2013). En annen svakhet ved denne modellen var at det i LID-modulen måtte legges inn svært mange parametere. Disse måtte i stor grad hentes ut fra litteratur og det var usikkert hvor godt disse samsvarte for det aktuelle taket. Denne modellen ble antatt å være best for normale regnmengder og lengre tids-serier, når takets utforming hadde mindre å si og vannet ikke rakk å stue seg opp ved sluk.

Modell 3

En tredje modell kombinerte Modell 1 og 2, ved at det blågrønne taket ble modellert som beskrevet i Modell 1 og det grønne taket ved hjelp av LID-modulen. Fordelene og ulempene var de samme som beskrevet i de respektive modellene. Siden det største taket hadde mest å si for den viderførte vannføringen ble denne modellen, i likhet med Modell

1, antatt å være være best for større regnhendelser.

Modell 4

Det siste alternativet var også en kombinasjon av de to første modellene. Begge tak ble bekrevet ved hjelp av LID-modulen før de deretter ble koblet opp mot hver sin lagringsenhet og restriktor. Hensikten med dette oppsettet var å vektlegge både takets og massenes egenskaper. Hovedutfordringen var at jordmassene ble medregnet to ganger, både i LID-modulen og i lagringsenhetene. Tykkelsen på jordlaget i LID-modulen måtte derfor reduseres og tilpasses underveis. Målet var at denne modellen skulle kunne passe for både store og små regnhendelser.

3.2.2 Parametere og kurver

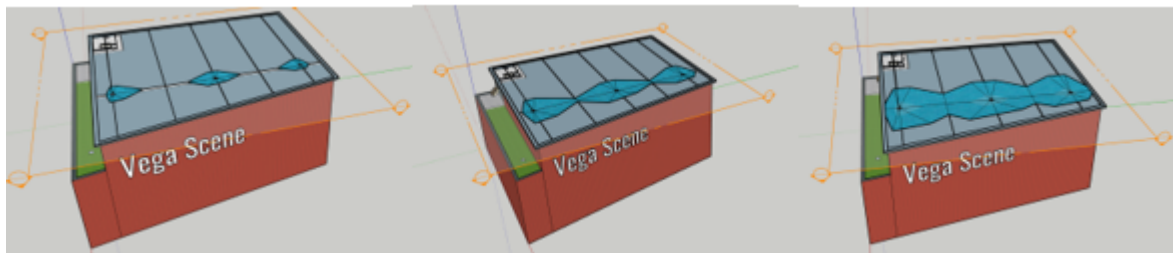
Verdier, parametere og forholdskurver for de ulike modellene måtte legges inn manuelt i SWMM. Forholdet mellom vannstand og areal var nødvendig input i lagringsenhetene, og for restriktorene måtte det legges inn en kurve som viste sammenhengen mellom vannstand og vannføring. I tillegg måtte det legges inn en rekke parametere for de ulike komponentene. Utformingen av delfeltet, som representerer takene, var spesielt viktig i modelloppbyggingen. Selv om massene på taket i virkeligheten består av lag med ulike egenskaper, ble modellen forenklet med antakelsen om midlere lagdybde og homogene masser. Nedenfor følger en beskrivelse av fremgangsmåten som ble benyttet til utarbeidelse av de nødvendige forholdskurvene. Tabell 3.1-3.4 gir en oversikt over verdier for de resterende parametrene som ble lagt inn i de ulike modellene.

Lagringskurve (storage curve)

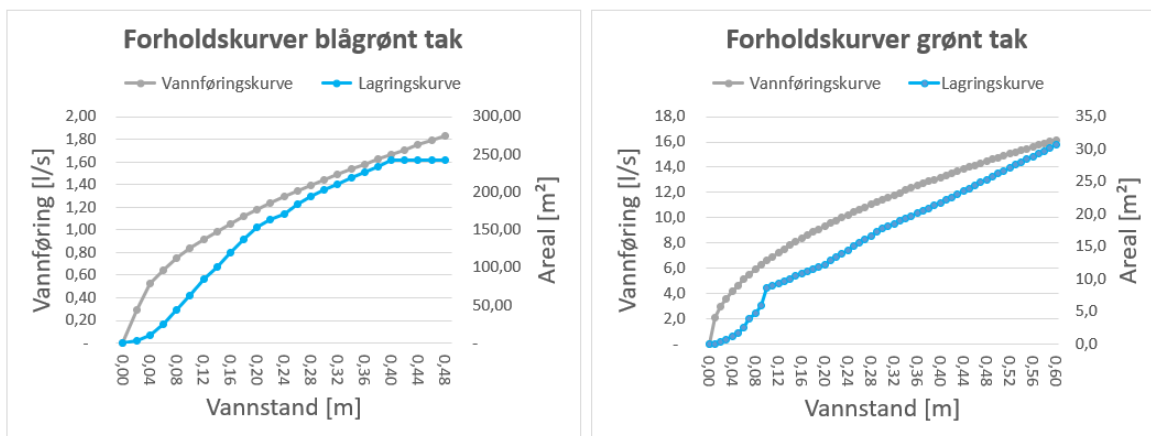
Grunnet helning og utforming vil det store taket ved mindre regnhendelser, eller i starten av større regnhendelser, bli delt i tre felt hvor vannet akkumuleres ved hvert sitt sluk. Etterhvert som regnet pågår og vannstanden begynner å øke, vil vannet renne over tersklene og feltene begynne å påvirke hverandre. Vannstanden ble visualisert i 3D-tegningsprogrammet Sketchup og Figur 3.5 viser at vannet renner over tersklene ved en vannstand h mellom 4 og 8 cm. Basert på forholdet mellom vannstand og areal ble det satt opp en såkalt lagringskurve, som deretter ble lagt inn som egenskap ved lagringsenheten i SWMM. Siden vannet bare kunne fylle hulrommene i det magasinerende materialet, ble arealet ganget med den effektive porøsiteten. Den samme fremgangsmåten ble benyttet for å sette opp lagringskurven for det grønne taket.

Vannføringskurve (rating curve)

Restriktoren i modellen hadde som funksjon å holde tilbake vann på taket og kontrollere vannføringen ut. Vannføringskurven beskriver forholdet mellom vannstand og vannfø-



Figur 3.5: Vanddekt areal på taket ved vannstand h lik 4, 8 og 12 cm.



Figur 3.6: Sammenheng mellom vannstand, vannføring og vanddekt areal for det blågrønne og det grønne taket.

ring. Her spiller geometrien til strupanordningen en vesentlig rolle. Vannføringen fra det store taket ble beregnet ved hjelp av likning 2.4 og 2.5, mens likning 2.6 ble benyttet til å sette opp vannføringskurven for det lille taket. Figur 3.6 viser lagrings- og vannføringskurver for hvert av takene.

Fordampning

I løpet av året, spesielt i sommermånedene, vil noe av nedbøren forsvinne fra systemet grunnet fordampning. SWMM lar brukeren tilpasse fordampningen på ulike måter, blant annet som en konstant verdi, et månedlig gjennomsnitt eller som tidsserier basert på temperaturmålinger. Det siste alternativet baserer seg på Hargreaves metode, og lager fordampningskurver basert på verdier for daglige temperaturvariasjoner (Farmer mfl., 2011). Denne tilnærmingen ble valgt for simuleringene, og verdier for minimum- og maksimumstemperatur ble hentet ut fra Norsk Klimaservicesenters database for observasjoner og værdata for de aktuelle tidsperiodene med utgangspunkt i målestasjon Blindern (Meteorologisk institutt, 2020).

Parametere i de ulike modellene

Mange av parameterene er typiske verdier for ulike overflater og jordmasser, og ble hentet fra brukermanualen til programmet. Takenes geometri og dybden på jordlagene

ble lest av fra tegninger oversendt av Asplan Viak og NVE. For parameterene i LID-modulen ble det etter beste evne hentet inn verdier for massenes egenskaper fra tidligere lignende studier. Henholdsvis 81% av det grønne og 100% av det blågrønne taket ble beskrevet ved hjelp av LID-typen "Green Roof". Parameterene "N Imperv." og "Dstore Imperv." representerer ruhet og gropmagasinerings på takenes overflate. Som utgangspunkt ble disse satt til å være 1 og 25 i Modell 1 og 3. De ble satt høyere enn typiske litteraturverdier for at nedbøren skulle få muligheten til å fordampe.

Tabell 3.1: Parametere som er felles for alle modellene.

Parameter	Verdi	Enhet	Kilde
Delfelt Blågrønt tak			
Area	0,06925	ha	NVE
Slope	2,5	%	Asplan Viak
Width	36,45	m	Beregnet
Delfelt Grønt tak			
Area	0,01085	ha	NVE
Slope	2,5	%	Asplan Viak
Width	4,77	m	Beregnet
Ledning			
Length	2	m	Eget estimat
Roughness	0,013	s/m ^{1/3}	Rossman, 1975
Lagringsenhet*			
Invert elevation	12	m	Eget estimat
Initial depth	0	m	Eget estimat
Storage curve	TABULAR	-	Se Figur 3.6
Kumpunkt			
Invert elevation	11	m	Eget estimat
Restriktor*			
Rating curve	TABULAR/DEPTH	-	Se Figur 3.6
Utløpsnode			
Invert elevation	10	m	Eget estimat
Type	FREE	-	NVE

*Komponenter inngår ikke i Modell 2

Parameteren "Berm Height" ble valgt til å være 0 i LID-modulen for å sørge for at nedbøren ikke kunne stues opp over jordlaget. Denne parameteren var dessuten allerede tatt høyde for i beregningen av lagringskurvene i Modell 4. Høydene på de ulike komponentene ble satt slik at det oppsto fall i systemet. En mer detaljert beskrivelse av hver enkelt parameter finnes i brukermanualen til programmet (Rossman, 1975).

Tabell 3.2: Unike parameterverdier for Modell 1 og 3. Som en konsekvens av at LID-modulen ikke dekker hele arealet av det grønne taket i Modell 3, må parameterene som beskriver den sorte delen av mesanintaket inkluderes.

Parameter	Verdi	Enhet	Kilde
Delfelt Blågrønt tak			
Imperv.	100	%	Eget estimat
N Imperv.	1	s/m ^{1/3}	Eget estimat
Dstore Imperv.	25	mm	Eget estimat
Zero Imperv	50	%	Eget estimat
Delfelt Grønt tak			
Imperv.	100	%	Eget estimat
N Imperv.	1/0,0175*	s/m ^{1/3}	Eget estimat, Rossman, 1975*
Dstore Imperv.	25/1,905*	mm	Eget estimat, Rossman, 1975*
Zero Imperv.	50	%	Eget estimat
LID-control	NO/YES*		Se tabell 3.4

*Gjelder for Modell 3

Tabell 3.3: Unike parameterverdier for Modell 2 og 4. Som en konsekvens av at LID-modulen ikke dekker hele arealet av det grønne taket, må parameterene som beskriver den sorte delen av mesanintaket inkluderes.

Parameter	Verdi	Enhet	Kilde
Delfelt Blågrønt tak			
LID-control	YES		Se tabell 3.4
Delfelt Grønt tak			
Imperv.	100	%	Eget estimat
N Imperv	0,0175	s/m ^{1/3}	Rossman, 1975
Dstore Imperv.	1,905	mm	Rossman, 1975
Zero Imperv.	50	%	Eget estimat
LID-control	YES		Se tabell 3.4

3.3 Målinger fra NVE

NVE har utstyrt taket med ulike måleinstrumenter for observasjon og erfaring til fremtidige prosjekter. Det måles blant annet nedbør, vannføring, vannstand, temperatur og vind. Målingene er tilgjengelige for offentligheten gjennom NVEs database Sildre. Mest relevant for denne oppgaven var de to førstnevnte. Den målte nedbøren ble delt opp og lagt inn som regnhendelser i SWMM. Vannføringsmålingene ble benyttet til kalibrering og verifisering av modellene. Driftsperioden er forskjellig for instrumentene. Avløpsmåleren ble satt i drift januar 2020, mens nedbørmålingen har pågått siden taket ble etablert i 2019.

Tabell 3.4: LID-parametere til bruk i Modell 2, 3 og 4. Med unntak av tykkelsen på jordlaget for Modell 4, er alle parameterene like.

Parameter	Enhet	Blågrønt tak	Grønt tak	Kilde
Surface				
Berm height	mm	0	0	Eget estimat
Vegatation volume	fraction	0,05	0,05	Eget estimat
Surface roughness	s/m ^{1/3}	0,1	0,15	Rossman, 1975
Surface slope	%	2,5	2,5	Asplan Viak
Soil				
Thickness	mm	350/60*	150/30*	Asplan Viak
Porosity	fraction	0,45	0,45	Paus, 2016
Field capacity	fraction	0,2	0,2	Rossman, 1975
Wilting point	fraction	0,1	0,1	Rossman, 1975
Conductivity	mm/hr	113	113	Allen mfl., 2010
Conductivity slope	-	50,6	50,6	Braskerud, 2014, Rossman, 1975
Suction head	mm	1,98	1,98	Rossman, 1975
Drainage				
Thickness	mm	3,8	1	Krebs, 2016
Void fraction	fraction	0,41	0,41	Krebs, 2016
Roughness	s/m ^{1/3}	0,1	0,1	Rossman, 1975

*Gjelder for Modell 4

Videreførte vannmengder

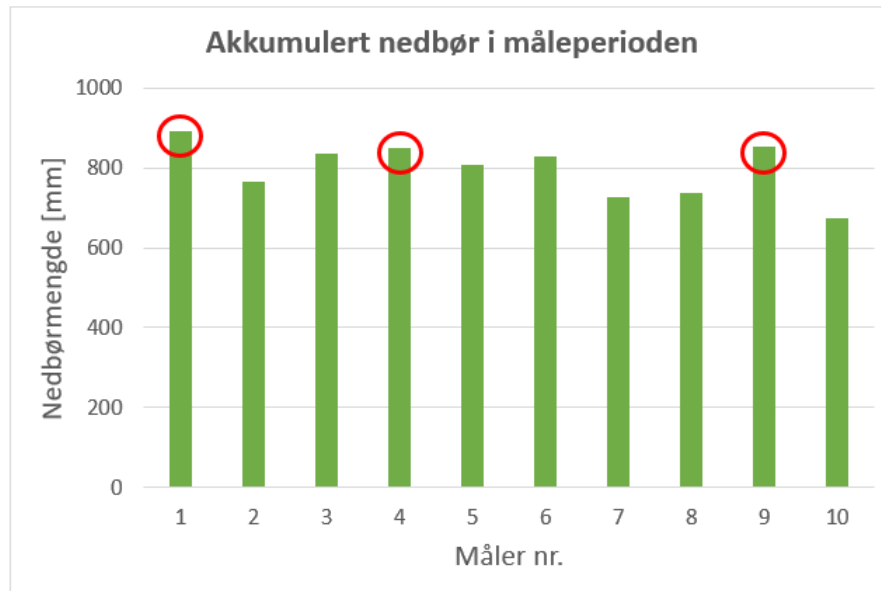
Avløpsmåleren logger samlet vannføring i m³/s fra både det blågrønne taket i 5.etasje og mesanintaket i 4.etasje. Det er punktmålinger gjort hvert 10. minutt som er utgangspunkt for datasettet. Det er ikke rapportert om forhold eller hendelser som gir grunn til å betvile avløpsmålerens nøyaktighet.

Nedbør

Taket er utstyrt med hele 10 nedbørmålere. Ni av disse står på hovedtaket og én står på mesanintaket. Målerne er av typen ”TippingBucket”, og gir en puls for hver 0.1mm nedbør. Teknisk er det akkumulert nedbør som logges, men denne kan enkelt regnes om til intensitet. Tidsoppløsningen til datasettet er 1 minutt.

Det har tidvis vært et problem at målerne går tette. Dette vil gi en forsinket eller for lav måling av nedbøren. Fugleaktivitet på taket har også gjort at det samler seg skitt i målerne. Tre av målerne (nr 2, 5 og 8) er oppvarmet for å bedre kunne ta vinternebbør, men måler 2 hadde lenge en feil på termostaten og fordampet vekk store deler av nedbøren. Målerne hadde et relativt stort avvik da de ble tatt i bruk. De ble kalibrert 15.juni 2020 og skal nå være innenfor ca 3% nøyaktighet(mailkorrespondanse Knut Magne Møen, 26.01.21). Målingene for kalibreringsdatoen ble manuelt justert til null.

På bakgrunn av dette var rådet fra NVE å bruke de målerne som gav mest nedbør som utgangspunkt for modellberegningene. Figur 3.7 viser at for tidsperioden datasettet omfattet, fra 17. januar 2020 til 26. januar 2021, var det måler nr 1, 4 og 9 som hadde den største mengden akkumulert nedbør. Et gjennomsnitt for disse tre målerne ble benyttet som utgangspunkt for nedbørhendelsene i SWMM.



Figur 3.7: Akkumulert nedbørmengde gjennom hele måleperioden i de ti målerne. Måler nr 1, 4 og 9, markert med rød ring, har de høyeste totalverdiene.

3.3.1 Oppdeling av data

På grunn av datasettenes størrelse var de vanskelig å behandle i sine oversendte Excel-formater. De ble derfor lastet inn i Python, oppdelt som beskrevet nedenfor og konvertert til riktig enhet der dette var nødvendig. Datasettene ble så lastet ned igjen til Excel, og gjort om til DAT-filer, som er det formatet SWMM krever for sine input-filer.

Langtidsnedbør

Datasettet ble først delt opp i måneder, hvor hver måned utgjorde en simulering. Formålet med langtidssimuleringene handlet hovedsaklig om å dokumentere takets effekt i forhold til Trinn 1 i tre-trinnsstrategien, og oppnåelsen av en ”perfekt” modell var ikke viktig i seg selv. Det viktigste for simuleringen med de månedlige intervallene var å sammenligne total vannføring. Fordelene med en slik oppdeling var at intervallene ble regelmessige og at det i stor grad ble tatt hensyn til at det allerede kunne stå vann på taket som følge av tidligere regnhendelser. Unntaket var ved månedskifte. Om det regnet mye 31.juli tok ikke modellen dette med i beregningen for 1.august.

Enkelthendelser

Taket ble dimensjonert for å tåle fremtidens 20 års regn (Paus og Alne, 2018), og dermed bidra til Trinn 2 i overvannsstrategien til Norsk Vann. Det var derfor interessant å utforske hvordan taket presterte under de store regnskyllene. I Norge, og spesielt på Østlandet, er det gjerne på sommeren at de mest intense nedbørshendelsene inntreffer og i små nedbørfelt er det ofte da de høyeste avrenningstoppene oppstår. Typiske regnhendelser utover høsten har ikke nødvendigvis den høye intensiteten, men varigheten på bygene kan likevel resultere i store mengder vann.

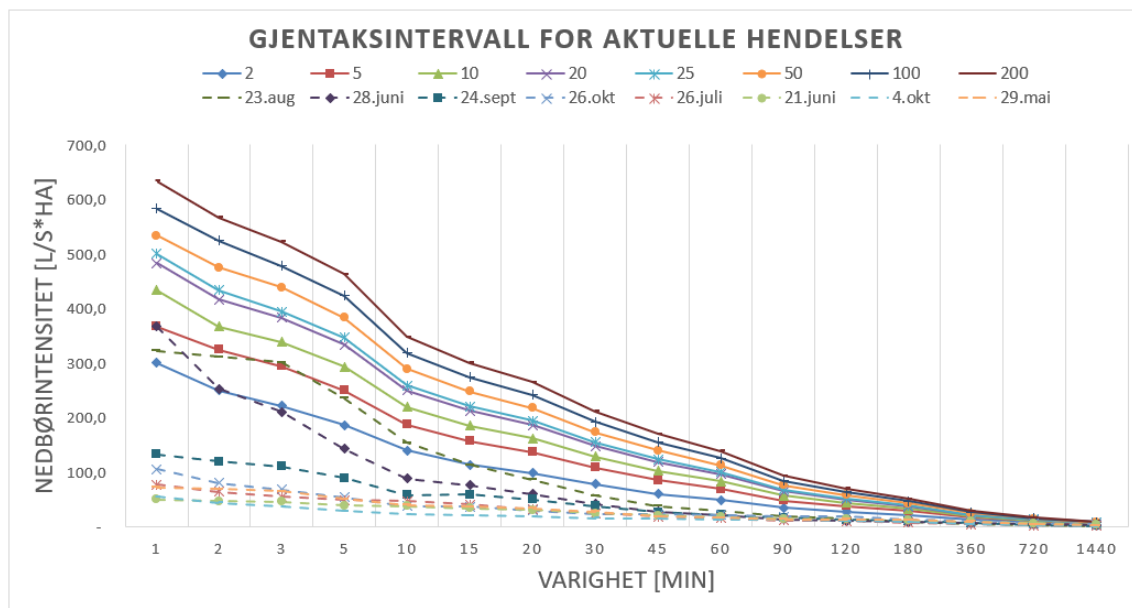
Tabell 3.5: De åtte største regnhendelsene basert på maksimal timesintensitet i 2020. Tabellen viser høyeste intensitet, tidspunkt for mest intense time, totalnedbør og varighet for hele hendelsen.

Dato	Mest intensive time		Totalt for hendelsen	
	Intensitet [mm/t]	Tidspunkt	Nedbør [mm]	Varighet [t]
23. august*	10,33	17.00 - 18.00	10,33	0,8
28.juni*	7,60	07.00 - 08.00	22,07	8,4
24.september	7,43	10.00 - 11.00	10,17	3,4
26.oktober	6,23	18.00 - 19.00	16,10	3,7
26.juli	5,70	17.00 - 18.00	7,93	2,6
21.juni	5,33	21.00 - 22.00	12,43	3,2
4.oktober*	4,70	18.00 - 19.00	14,20	8,4
29.mai*	4,57	11.00 - 12.00	20,67	4,6

*Hendelser til kalibrering

Basert på de høyeste timesverdiene for nedbør ble de åtte største hendelsene plukket ut. Disse er vist i Tabell 3.5. Hendelser med en totalvarighet mindre enn 30 minutter ble neglisjert. Denne utelatelsen ble gjort for å motvirke at store forskjeller tidlig i regnhendelsene skulle få stor betydning. På grunn av modellenes oppbygning vil vannet renne raskt til og akkumulere ved sluk, mens nedbøren i virkeligheten vil spres i større grad og ha en lengre tilrenningstid. For disse åtte hendelsene var det viktigst at den modellerte spissavrenningen traff med den observerte. Total vannføring og formen på hydrogrammet ble i tillegg vektlagt. Halvparten av hendelsene ble valgt ut til kalibrering av modellen, mens de resterende ble benyttet til verifisering.

Figur 3.8 viser at 2020 var et år uten regnhendelser i samme kategori som taket påregnelig ble dimensjonert for. Hendelsene som fant sted 28.juni og 23.august var de største, og kan sammenlignes med 5-års regn for varigheter på 1 og 3 minutter. De seks resterende regnene hadde alle lavere intensitet og varighet enn et regn som statistisk inntreffer én gang i løpet av 2 år.



Figur 3.8: IV-kurvene viser intensiteten til de største hendelsene sammenlignet med karakteristiske regn med ulike gjentaksintervall. De stiplede linjene representerer regnene i Tabell 3.5.

3.4 Kalibrering og verifisering

Modellene som ble kjørt for de lange tidsseriene med hensyn på total avrenning ble kun kalibrert opp mot observerte verdier og ikke videre verifisert. Siden datasettet kun omfattet ett år, og det var stor forskjell mellom nedbørmengde, temperatur og fordampningspotensiale i de ulike månedene, egnet de seg dårlig for sammenligning. Å plukke ut et utvalg måneder til verifisering ville derfor vært lite hensiktsmessig.

Forutsetningene som skyldtes sesongvariasjoner samsvarte bedre for de intensive hendelsene. For disse ble annenhver regnhendelse, i kronologisk rekkefølge, valgt ut til kalibrering og verifisering.

3.4.1 Kalibrering

I alle fire modellene var det hovedsaklig parametere som beskrev delfeltet det ble knyttet usikkerhet til. Av disse ble det antatt at geometrien, altså areal, bredde og helning, var kjente fastsatte verdier som ikke varierte. Modell 1 og 3 hadde ingen permeable arealer. Det var kun endringer i overflateruhet (N_{Imperv}) og gropmagasinerings ($D_{store Imperv}$) på tette flater som kunne ha innvirkning på disse modellene. Ruheten påvirker tregheten i systemet, mens gropmagasinerings har sammenheng med fordampningen. Usikkerheten forbundet med disse to parameterne er presentert i Tabell 3.6. I Modell 2 og 4 var det først og fremst knyttet usikkerhet til verdiene som ble lagt inn i LID-modulen. I Modell 4 var det stor usikkerhet rundt valg av tykkelse på jordlaget og felles for de to model-

Tabell 3.6: Kalibreringsparameterere med min-, middel- og maks-verdier aktuelle for Modell 1 og 3.

Parameter	Enhet	Min	Middel	Maks	Kilde
Dstore Imperv.	mm	0	25	50	Eget estimat
N Imperv.	s/m ^{1/3}	0	1	2	Eget estimat

lene var usikkerhet tilknyttet hydraulisk konduktivitet og overflateruhet(Manning's N). Disse er presentert i Tabell 3.7.

Tabell 3.7: Kalibreringsparametere med min-, middel- og maks-verdier aktuelle for Modell 2 og 4. Det første tallet for tykkelse gjelder for det blågrønne taket, det andre tallet for det grønne.

Parameter	Enhet	Min	Middel	Maks	Kilde
Thickness *	mm	20 + 10	60 + 30	100 + 50	Eget estimat
Hydraulic conductivity	mm/hr	18	113	208	Allen mfl., 2010
Manning's N	s/m ^{1/3}	0	0.5	1	Rossmann, 1975

*Gjelder kun Modell 4

3.4.2 Sensitivitetsanalyse

For å finne hvilken påvirkning de ulike kalibreringsparameterene hadde for maksimal og total vannføring ble det utført en sensitivitetsanalyse. Endringene ble gjort for én parameter av gangen, med utgangspunkt i min-, maks- og middelveidier. Analysen ble gjennomført for alle hendelsene som var plukket ut til kalibrering og dannet grunnlaget for hvilken rekkefølge parameterne senere skulle kalibreres i. Den mest følsomme parameteren ble kalibrert først. Likning 3.1 (Lee mfl., 2017) ble benyttet til å regne ut sensitiviteten til hver av parameterene:

$$Sensitivitet = \frac{\Delta MR / MR}{\Delta p / p} \quad (3.1)$$

hvor

MR = simulering med initialverdier

ΔMR = forskjellen mellom MR og simuleringen med endret parameterverdi

p = initialverdi for parameteren

Δp = endring i parameterverdi

Det er viktig å presisere at sensitivitetsanalyser ikke er ment for å jakte på signifikante resultater. De er ment å komplementere den forhåndsbestemte analysen i oppgaven, og på den måten gi økt tiltro til resultatene og konklusjonene som trekkes fra denne(Stavseth, 2020).

3.4.3 Verifisering

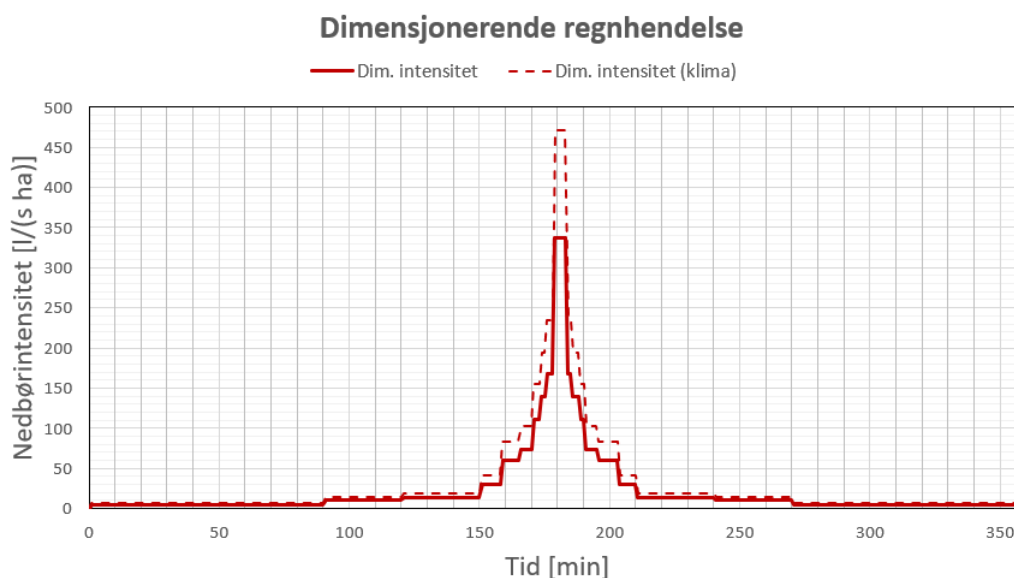
Som en kvalitetssikring av modellen for Trinn 2 ble et utvalg av hendelsene plukket ut til verifisering. Verifiseringen ble hovedsaklig gjort med hensyn på spissavrenning, men totalavrenning og NSE ble også vektlagt. Resultatene ble sammenlignet med modellresultatene fra de kalibrerte nedbørshendelsene. En skjønnsmessig vurdering av resultatene ble gjort med utgangspunkt i modellens formål.

3.5 Historiske og fremtidige regn

Etter kalibrering og verifisering ble det utført gjennomkjøringer med lange, historiske nedbørserier og fremtidige, intensive hendelser.

Historiske regn

Fra Norsk Klimaservicessenters base for værdata kan nedbørmålinger i mm/t helt tilbake til juli 2010 hentes ut. Målingene frem til april 2021 ble lastet ned og lagt inn som én sammenhengende regnhendelse i SWMM. Fra samme kilde ble også en ny dataserie for temperaturvariasjoner hentet ut og lagt inn i fordampningsmodulen. Ved å kjøre dette regnet gjennom modellen som ble optimalisert for simulering av Trinn 1 og lese av avrenningskoeffisienter var det mulig å få et estimat på hvor mye fremmedvann man i løpet av denne tidperioden kunne holdt tilbake og spart ledningsnettene for.



Figur 3.9: Symmetrisk blokkhyetogram med varighet 6 timer og beregningssteg 1 minutt basert på IVF-kurven fra Blindern. Den heltrukne linja representerer dimensjonerende hendelse basert på dagens situasjon, mens den stiplede linja tar hensyn til fremtidens økning i nedbør og inkluderer en klimafaktor på 1,4.

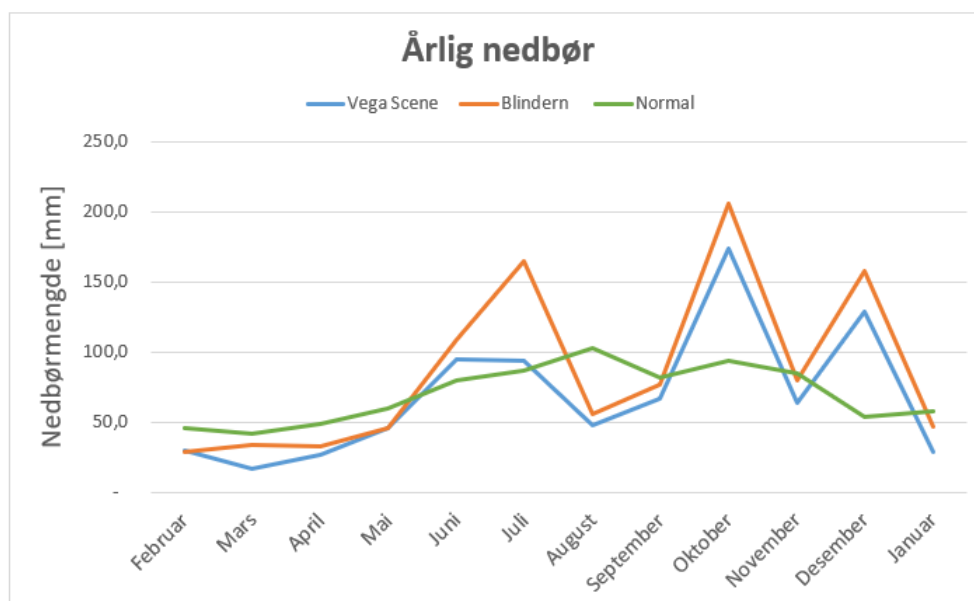
Fremtidige regn

For å teste ut hvordan taket responderte på et ekstremregn ble det konstruert et symmetrisk blokkhyetogram for 20-års hendelsen med klimafaktor 1,4 basert på IVF-kurven fra Blindern målestasjon (Norsk klimaservicesenter, 2021). Dette er presentert i Figur 3.9. Ved å kjøre regnet gjennom modellen som ble optimalisert for Trinn 2 var det mulig å finne ut av hvor mye spissavrenningen reduseres ved et slikt tiltak og om taket evnet å holde tilbake like mye vann som det ble antatt i dimensjoneringen.

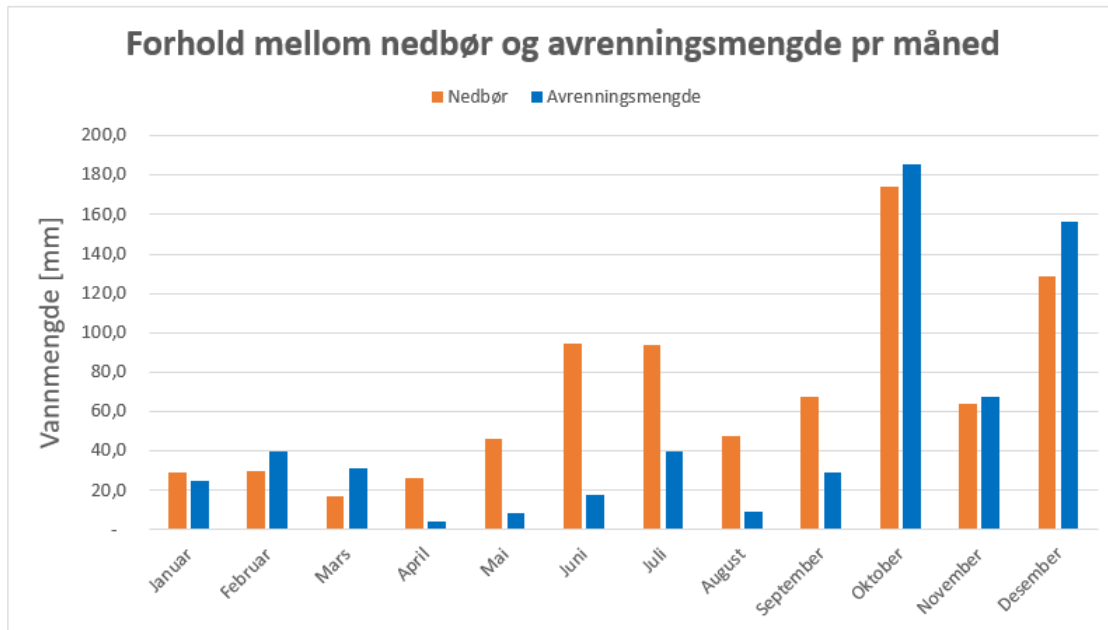
4. Resultater og diskusjon

4.1 Måledata fra NVE

Ifølge data fra Meteorologisk institutt summerer nedbørmengden ved Blindern målestasjon i Oslo seg til 836,3mm i løpet av et normalår (Meteorologisk institutt, 2020). Over året fordeles nedbøren som vist i Figur 4.1. Målinger fra den samme stasjonen viste en total på 1036,5mm i tidsperioden 01.02.2020 - 01.02.2021. Totalmengden for dette året lå dermed 25% høyere enn normalt, og målingene for juli, oktober og desember sto for de største avvikene. Målerne på Vega Scene som er brukt i simuleringene registrerte 818,3mm i samme periode. For alle måneder, med unntak av februar og mai, har målerne på taket målt mindre enn de på Blindern. Selv om det selvsagt er lokale variasjoner i nedbør, kan dette avviket tyde på at målerne på Vega Scene systematisk måler for lite. Ifølge NVE var flere av nedbørmålerene ganske feilkalibrerte fra fabrikk, og målingene gjort før kalibreringen 15.juni er derfor mer usikre. Fugleaktivitet på taket og skitt i målerne trekkes også frem som mulige årsaker til feilaktige målinger.



Figur 4.1: Nedbørmålinger gjort ved Vega Scene og Blindern målestasjon i 2020 sammenlignet med verdiene for et normalår.



Figur 4.2: Akkumulert nedbør og vannføring fordelt på årets tolv måneder.

Figur 4.2 sammenligner den månedlige nedbøren og avrenningen. Den totale avrenningsmengden ligger lavere enn den totale nedbøren, og indikerer at rundt 25% av nedbøren forvinner før den når sluket. I månedene mai, juni og august er andelen som forlater systemet over 80%. Bygenedbør er hovedårsaken til at sommeren er årstiden med mest nedbør i store deler av innlandet. Bygene oppstår som følge av at luften nær bakken blir varmet opp av sola på dagtid, og når denne stiger om ettermiddagen dannes skyer og kortvarige, ofte intense regnskyll (Sivle, 2020). De jevnlig tørkeperiodene og den høye temperaturen legger til rette for at nedbør kan forlate systemet gjennom fordampning.

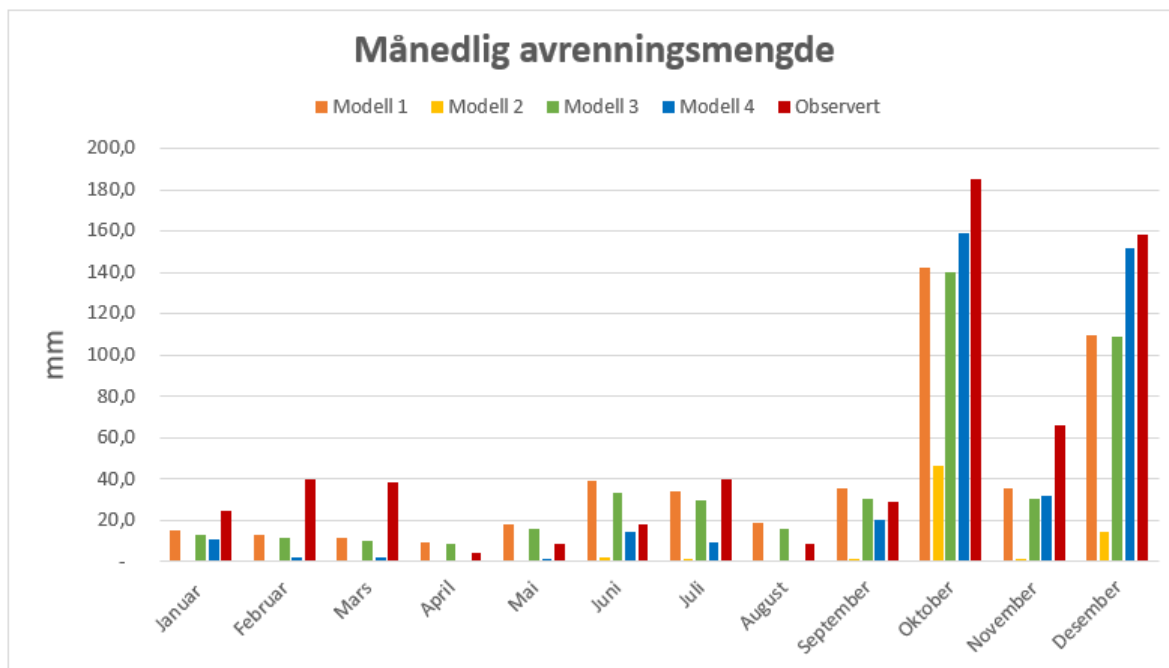
Fra oktober til mars er søylene for vannføring høyere enn de for nedbør. For alle måneder, med unntak av den siste, kan en mulig forklaring på dette avviket være at nedbørmålerne på taket systematisk måler for lite. I løpet av vinteren faller nedbøren ofte som snø. Denne vil legge seg på taket og ikke bidra med avrenning før den smelter, gjerne i overgangen fra vinter til vår. Avviket i mars er med stor sannsynlighet en konsekvens av dette.

4.2 Modell

4.2.1 Langtidsnedbør

Trinn 1 - Total vannføring

Figur 4.3 viser månedlig avrenningsmengde generert i de ulike modellene. Simuleringene med Modell 2 gav de største avvikene. Sammenlignes de årlige avrenningsmengdene i



Figur 4.3: Månedlig avrenningsmengde for de fire modellene med initialverdier sammenlignet med observerte verdier.

Tabell 4.1: Årlig avrenningsmengde for de fire modellene med initialverdier sammenlignet med observerte verdier.

	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Observert
Årlig avrenningsmengde [mm]	386,7	58,0	359,5	323,3	497,9

Tabell 4.1 utgjør den totale verdien for denne modellen kun 12% av den observerte. Hovedgrunnen til dette er trolig at jordlagene i LID-modulen var tykkere enn det som er normalt for grønne tak, og modellen evnet derfor å ta opp og fordampe vekk nesten all nedbøren. Figur 4.3 viser at det stort sett kun var i oktober og desember, månedene med mest og sammenhengende regn, at denne modellen genererte avrenning. Simuleringene resulterte også i en svært høy gjennomsnittlig volumfaktor, se Tabell 4.2. Grunnet generelt dårlige resultater ble denne modellen derfor utelatt fra videre testing.

Modell 1 og 3 gav de beste resultatene totalt sett, men den månedlige fordelingen viser at de begge hadde en tendens til å overestimere i sommerhalvåret og underestimere i vinterhalvåret. Modell 4 underestimerte vannføringen i alle årets tolv måneder, spesielt i overgangen fra vinter til vår. Det ble gjort antakelser om hvordan dobbel representasjon av jordmassene i denne modellen skulle unngås, og resultatene tydet på at disse verdiene trolig måtte justeres ytterligere for å få et bedre resultat.

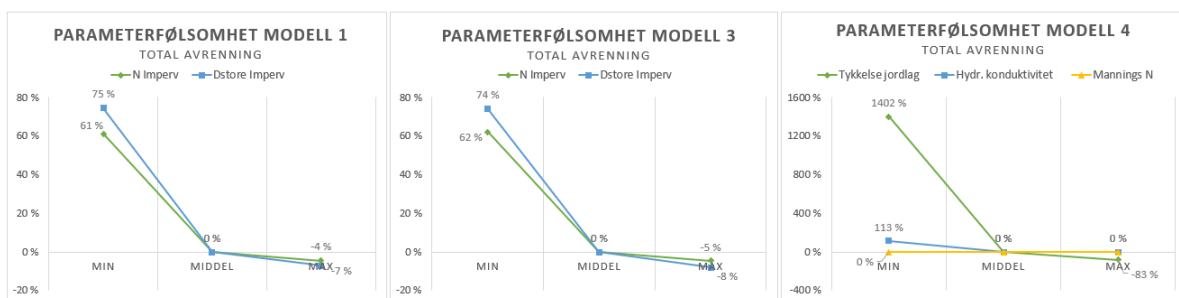
Tabell 4.2: Volumfaktor (Qobs/Qsim) for de ulike modellene med initialverdier.

Volumfaktor før kalibrering				
Måned	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Januar	1,63	33,15	1,87	2,29
Februar	2,98	63,68	3,45	22,11
Mars	3,37	61,52	3,89	15,69
April	0,47	7,34	0,54	45,82
Mai	0,47	8,68	0,54	5,83
Juni	0,46	8,92	0,53	1,25
Juli	1,17	22,66	1,34	4,20
August	0,48	8,95	0,56	15,91
September	0,82	19,53	0,95	1,45
Oktober	1,30	3,99	1,32	1,17
November	1,86	52,88	2,15	2,06
Desember	1,44	10,65	1,45	1,04
Gj.snitt	1,37	26,16	1,55	9,90

Sensitivitetsanalyse

I sensitivitetsanalysen ble simuleringer kjørt for Modell 1, 3 og 4 for alle måneder med verdiene oppgitt i Tabell 3.6 og 3.7. Initialverdiene ble brukt som referanse.

Figur 4.4 viser at parameterene som ble analysert i Modell 1 og 3 var omtrent like følsomme for endring. Et interessant funn var at års- og temperaturvariasjoner påvirket parameterenes optimalverdi. I sommermånedene var den simulerte vannføringen nærmest den observerte når kalibreringsparameterene var satt til sin maksimumsverdi, mens på vinteren var situasjonen den motsatte. Dette kan sees i sammenheng med at de opprinnelige modellene overestimerte på sommeren og underestimerte på vinteren.



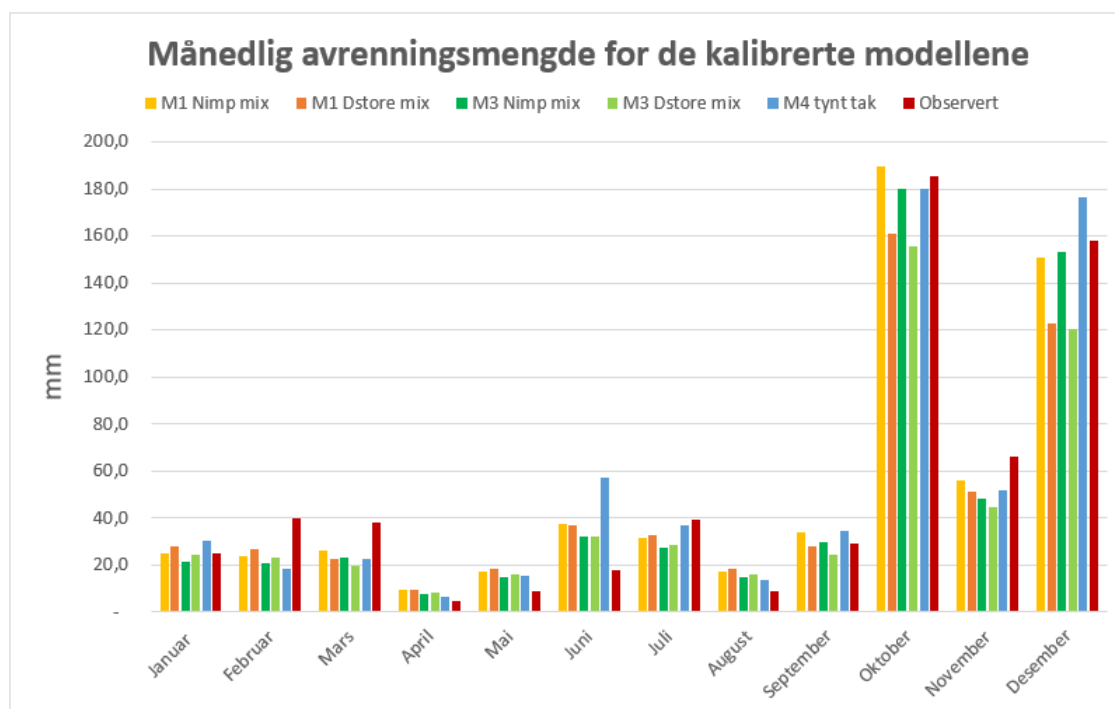
Figur 4.4: De tre figurene viser hvor følsomme de ulike parameterene er for endringer i de tre modellene. Følsomheten baserer seg på gjennomsnittet av månedene.

For Modell 4 var tykkelsen på jordlaget den mest følsomme parameteren. I sommermånedene hadde også endringer i hydraulisk ledningsevne betydning, men på langt nær i like stor grad som jordlagstykkelsen. Endringer i overflateruhet hadde ingen påvirkning. Dette belyser en av hovedutfordringene ved å representere LOD-tiltak ved hjelp av LID-

modulen. Modulen fremstår som et enkelt hjelpemiddel, men det er vanskelig å få et godt bilde av hvilke prosesser som foregår og hvilke parametere som påvirker resultatet. Med unntak av juni måned gav modellen best resultater når tykkelsen på jordlagene var satt til minimumsverdien.

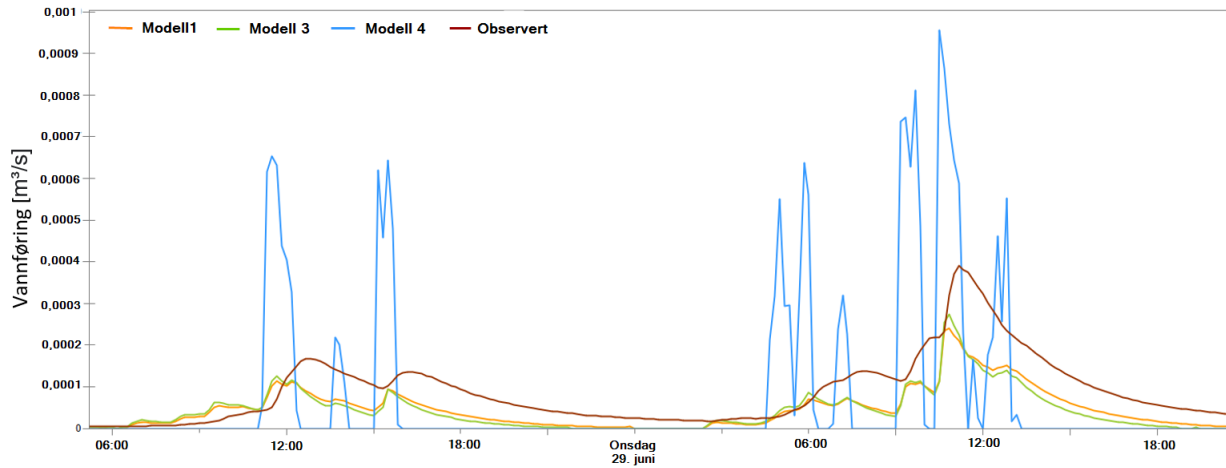
Kalibrering

I Figur 4.5 er ulike justerte varianter av Modell 1, 3 og 4 basert på sensitivitetsanalysen sammenlignet med de observerte målingene. Årsvariasjonen ble tatt hensyn til i Modell 1 og 3, og i modellene "Nimp mix" og "Dstore mix" er det benyttet maksimumsverdier fra april t.o.m september og minimumsverdier for de resterende månedene. For Modell 4 ble det tynne jordlaget valgt for hele perioden, siden årsvariasjoner hadde mindre betydning i dette tilfellet. Tabell 4.3 viser at alle de gjennomsnittlige volumfaktorene ble forbedret etter kalibrering. Modell 1 og 4 resulterte i verdier nærmest det optimale.



Figur 4.5: Månedlig avrenningsmengde generert i de kalibrerte modellene.

På grunn av oppbyggingen er Modell 1 den modellen brukeren selv har mest kontroll over, og anbefales derfor til bruk når regnseriene er korte og utelukkende omfatter sommer- eller vinternedbør. Er regnseriene lengre enn dette, vil modellen kreve manuell justering siden parameterenes optimalverdi påvirkes av sesong. Ved lange regnsrier anbefales Modell 4 med tynt tak, siden parameteren for jordlagstykkelse kan holdes konstant gjennom året. Likevel kan det diskuteres om Modell 4 bør brukes siden denne visuelt sett har dårligere samsvar med de observerte vannføringskurvene enn Modell 1 og 3, se eksempel Figur 4.6.



Figur 4.6: Eksempel på hvordan avrenningskurvene så ut for de ulike modellene. Figuren viser en tilfeldig hendelse i juli, men tendensen var den samme for alle dager og måneder. Modell 1 og 3 samsvarer bedre med den observerte kurven enn Modell 4.

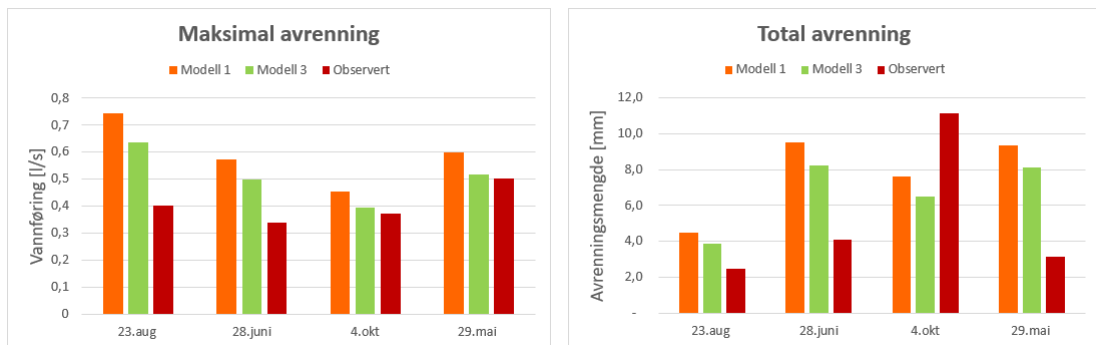
Tabell 4.3: Volumfaktor ($Q_{\text{obs}}/Q_{\text{sim}}$) for de ulike modellene etter kalibrering.

Volumfaktor etter kalibrering					
Måned	M1 Nimp mix	M1 Dstore mix	M3 Nimp mix	M3 Dstore mix	M4 tynt tak
Januar	1,00	0,89	1,14	1,03	0,81
Februar	1,67	1,49	1,92	1,73	2,13
Mars	1,48	1,69	1,67	1,95	1,67
April	0,50	0,47	0,57	0,55	0,71
Mai	0,50	0,47	0,58	0,54	0,55
Juni	0,48	0,48	0,55	0,56	0,31
Juli	1,24	1,21	1,44	1,39	1,07
August	0,52	0,48	0,60	0,56	0,64
September	0,86	1,04	0,99	1,20	0,84
Oktober	0,98	1,15	1,03	1,19	1,03
November	1,18	1,29	1,37	1,48	1,27
Desember	1,05	1,29	1,03	1,31	0,90
Gj.snitt	0,96	1,00	1,07	1,12	1,00

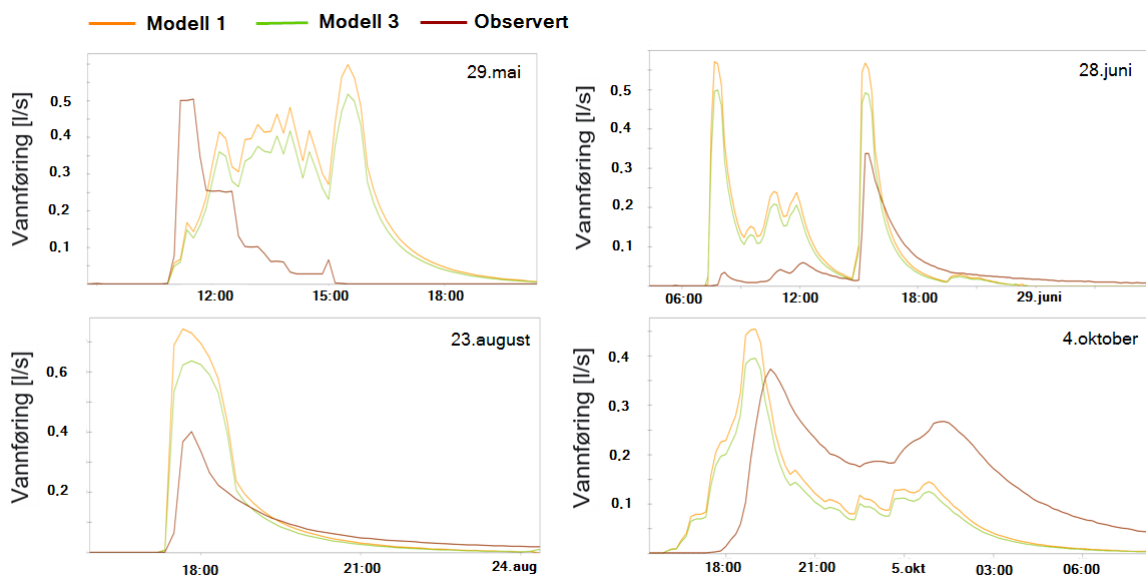
4.2.2 Enkelthendelser

Trinn 2 - Maksimal vannføring

Basert på det visuelle inntrykket ble Modell 4 vurdert til å være et dårlig alternativ for Trinn 2. Selv om den totale vannmengden stemte nokså godt, avvek formen på avrenningskurven og maksimal avrenning såpass mye at modellen ikke var egnet til formålet. Modell 1 og 3 sto dermed igjen som de aktuelle kandidatene for tilnærming med tanke på spissavrenning og store hendelser. Resultatene med initialverdier, for hendelsene som ble plukket ut til kalibrering, er presentert i Figur 4.7 og 4.8.



Figur 4.7: Maksimal og total avrenning i Modell 1 og 3 med initialverdier sammenlignet med observerte.



Figur 4.8: Utklipp av hendelsene plukket ut til kalibrering med initialverdier. Modell 1 er representert ved oransje linje, Modell 3 ved grønn og observerte verdier er markert med mørk rød.

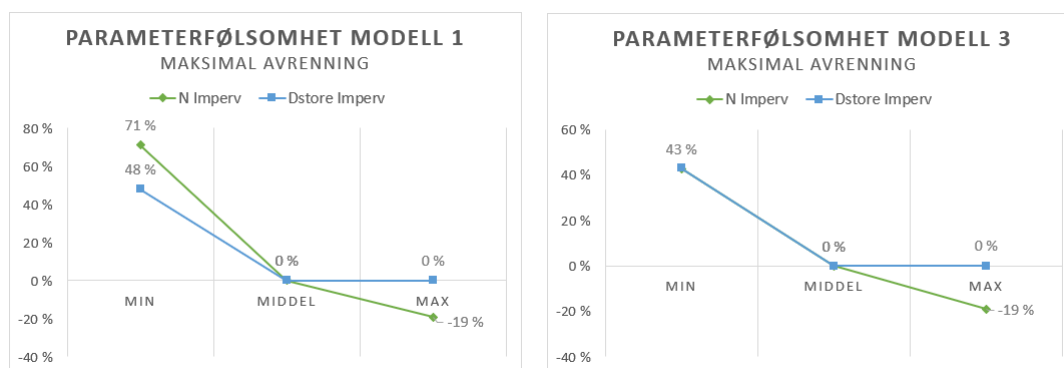
Den maksimale vannføringen ble overestimert for alle hendelsene og avvek mest i august og juni. Overestimering av maksimal avrenning har også tidligere blitt trukket frem som

et problem ved modellering av grønne tak i SWMM (Russwurm mfl., 2018). Simuleringsresultatene for august var henholdsvis 85% og 58% høyere enn observert for Modell 1 og 3. Avviket for juni var på 69% og 48%. For de to resterende hendelsene var avviket rundt 20% for Modell 1 og 5% for Modell 3.

I 3 av 4 tilfeller ble også den totale vannføringen overestimert. Dette skjedde i de typiske vår- og sommermånedene. Overestimeringen tyder på at verdier som påvirker fordampningen var satt for lavt. Høyere verdier for gropmagasinerings og overflateruhet ville økt vannets tilrenningstid og lagt til rette for at en større andel av nedbøren kunne forlate systemet gjennom fordampning.

4.2.3 Sensitivitetsanalyse

På samme måte som for langtidssimuleringene, ble parametersensitiviteten testet for enkelthendelsene. Sensitivitetsanalysen ble utført for de samme parameterene, og med de samme ytterpunktene. Figur 4.9 viser at parameteren som beskriver ruheten på takets overflate skilte seg ut som den mest sensitive for begge modellene.



Figur 4.9: Figurene viser hvor følsomme parameterene for gropmagasinerings og overflateruhet er for endringer i de to modellene. Følsomheten baserer seg på et gjennomsnitt av de fire enkelthendelsene.

4.2.4 Kalibrering

Modellene ble først kalibrert for ruhet. Det ble også forsøkt å kombinere de to parameterene, men dette gav ingen forsterkende effekt og resulterte i de samme verdiene som maksimal "N Imperv." alene. Selv med det øverste ytterpunktet overestimerte Modell 1 spissavrenningen i 4 av 4 tilfeller. Ut i fra dette ble det antatt at parameteren som representerte ruhet for denne modellen hadde en optimalverdi >2 . Simuleringer utført med parameterverdi lik 3 gav bedre resultater for to av hendelsene. I Modell 3 gav 50% av hendelsene en spissavrenning nærmest den observerte med verdi lik 1, og 50% med verdi lik 2. Basert på funnene ovenfor ble parameteren for overflateruhet kalibrert til 2,5 i Modell 1 og 1,5 i Modell 3.

Tabell 4.4 og 4.5 viser volumfaktorer og NSE-verdier før og etter kalibrering. Etter kalibreringen ble samtlige gjennomsnittsverdier forbedret. Både Modell 1 og 3 gav maksimal- og totalavrenninger nokså nært de observerte målingene. Det gjennomsnittlige avviket vektet med hendelsenes varighet var på 14% for Modell 1. Tilsvarende verdi for Modell 3 var 16%. Avviket for Modell 1 var lavest for hendelsene i mai og juni, mens den maksimale avrenningen samsvarte best med den observerte i mai og oktober for Modell 3.

Tabell 4.4: Volumfaktor($Q_{\text{obs}}/Q_{\text{sim}}$) og NSE før kalibrering. Snittet for volumfaktor total og NSE er vektet med hendelsenes varighet.

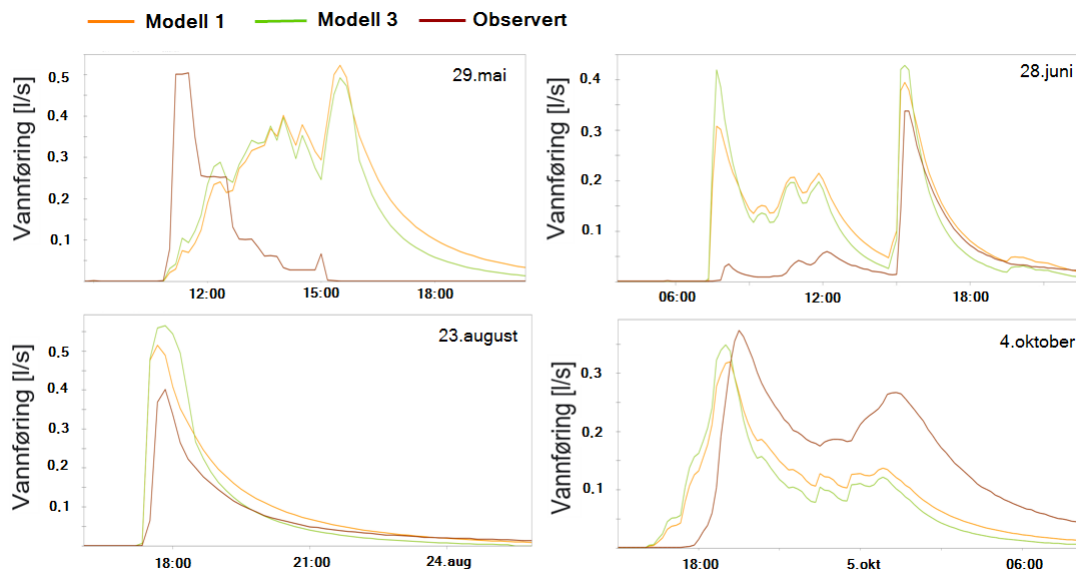
	Volumfaktor, maksimal		Volumfaktor, total		NSE	
	Modell 1	Modell 3	Modell 1	Modell 3	Modell 1	Modell 3
23.aug	0,54	0,63	0,55	0,64	-2,60	-1,19
28.juni	0,59	0,68	0,43	0,50	-3,40	-2,20
4.okt	0,82	0,95	1,46	1,72	-0,21	-0,21
29.mai	0,84	0,97	0,33	0,38	-3,36	-2,32
Gj.snitt	0,70	0,81	0,81	0,94	-2,16	-1,44

Tabell 4.5: Volumfaktor($Q_{\text{obs}}/Q_{\text{sim}}$) og NSE etter kalibrering. Snittet for volumfaktor total og NSE er vektet med hendelsenes varighet.

	Volumfaktor, maksimal		Volumfaktor, total		NSE	
	Modell 1	Modell 3	Modell 1	Modell 3	Modell 1	Modell 3
23.aug	0,87	0,71	0,77	0,69	0,18	-0,19
28.juni	0,94	0,79	0,49	0,51	-1,10	-1,30
4.okt	1,30	1,07	1,65	1,72	0,29	0,00
29.mai	1,06	1,02	0,42	0,40	-2,85	-2,27
Gj.snitt	1,04	0,90	0,92	0,95	-0,89	-0,97

Selv om NSE-verdiene også økte var de stort sett negative både før og etter kalibrering. Disse verdiene er et mål på hvor godt hele avrenningsforløpet stemmer med det observerte, og siden modellene først og fremst ble kalibrert med hensyn til maksimal avrenning var en mulig konsekvens at NSE-verdien forble lav. En negativ eller lav verdi for NSE kan bety at høyden på toppene avviker, men en annen forklaring er forskyvning i tid.

Hendelsene 29.mai og 28.juni skilte seg ut med de laveste NSE-verdiene. Figur 4.10 viser at samsvaret mellom kurvene ikke var signifikant forbedret etter kalibrering. Dette kan tyde på at andre faktorer enn de som er plukket ut til dette formålet har innvirkning på avrenningsforløpet. Studier viser at jordas innhold av vann ved regnstart har stor påvirkning på retensjonsevnen, og at mulighetene for å tilbakeholde vann minker med økende vanninnhold (Palla mfl., 2010). Spesielt i juni er det grunn til å tro at høye



Figur 4.10: Utklipp av hendelsene plukket ut til kalibrering med justerte verdier. Modell 1 er representert ved oransje linje, Modell 3 ved grønn og observerte verdier er markert med mørk rød.

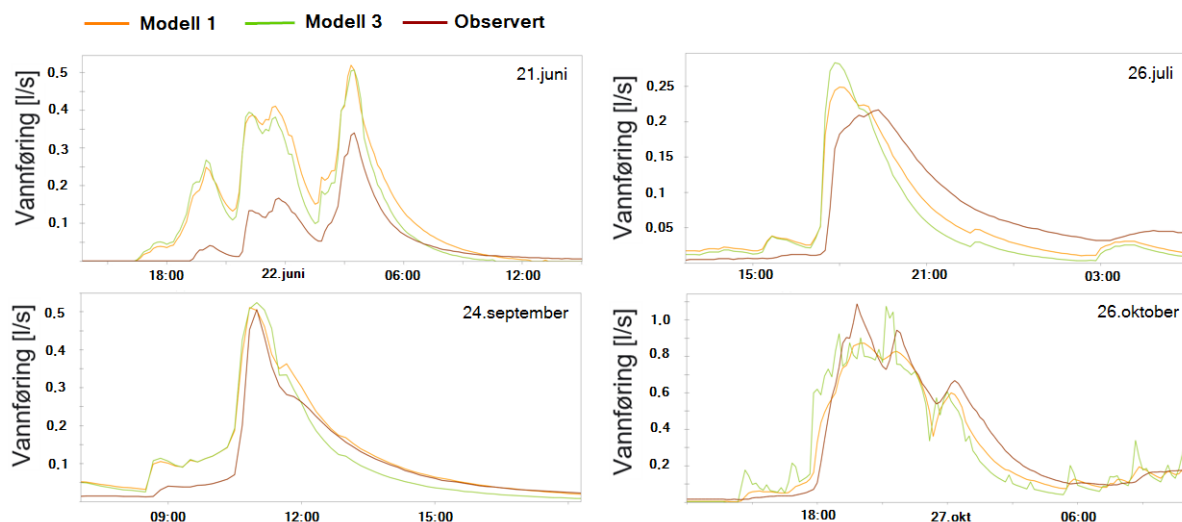
temperaturer og kortvarige byger bidro til at jordmassene var tørrere enn antatt. Det er derfor mulig at den effektive porøsiteten burde økes i modelloppsettet for oppnåelse av en høyere NSE-verdi. Hvor raskt jordmassenes hydrauliske ledningsevne avtar med avtagende fuktighetsinnhold har sammenheng med nedbørintensiteten (Russwurm mfl., 2018), og finstilling av denne parameteren kunne også bidratt til å bedre samsvaret.

Den simulerte spissavrenningen for hendelsen i mai oppsto flere timer etter den observerte. En mulig forklaring på dette kan være at denne hendelsen, som den eneste av de fire, utspilte seg før nedbørmålerne ble kalibrert 15.juni. Før denne datoen hadde nedbørmålingene en tendens til både å være for lave og forsinket i tid, faktorer som bidrar til å forskyve modellresultatene mot høyre på tidsaksen.

4.2.5 Verifisering

Grunnen til at man ønsker å verifisere modeller er for å få en bekreftelse på at metoden som er brukt også fungerer for hendelser som ikke er benyttet til selve modellutformingen. Fire av hendelsene i Tabell 3.5 ble plukket ut til dette formålet. Figur 4.11 viser at modellene samsvarte godt for hendelsene i juli, september og oktober, både med hensyn til vannføringstopp og avrenningsforløp. NSE-verdiene i Tabell 4.6 var overraskende gode for disse tre hendelsene, og høyere enn de fra avsnittet om kalibrering. Spesielt skilte Modell 1 seg positivt ut.

For hendelsen 21.juni stemte formen på kurven godt, men lå for høyt. Dermed ble den maksimale vannføringen overestimert og NSE-verdien mindre enn for de andre hendel-



Figur 4.11: Figuren viser utklipp fra de fire hendelsene som er plukket ut til verifisering av modell. Modell 1 er representert ved oransje linje, Modell 3 ved grønn og observerte verdier er markert med mørk rød.

Tabell 4.6: Volumfaktor(Q_{obs}/Q_{sim}) og NSE for hendelsene som er plukket ut til verifisering av modell.

	Volumfaktor, maksimal		Volumfaktor, total		NSE	
	Modell 1	Modell 3	Modell 1	Modell 3	Modell 1	Modell 3
24.sept	1,10	0,97	0,88	0,90	0,88	0,74
26.okt	1,38	1,01	1,17	1,09	0,86	0,67
26.juli	0,96	0,77	1,15	1,19	0,48	-0,16
21.juni	0,71	0,67	0,45	0,47	-0,92	-1,12
Gj.snitt	1,04	0,85	0,91	0,91	0,35	0,08

sene. Mulige årsaker til dette antas å være de samme som de trukket frem for junihendelsen i kalibreringsutvalget. En studie fra Oslo undersøkte nøyaktigheten til modeller av grønne tak i SWMM, og i likhet med denne studien var variasjonen i NSE stor mellom hendelser. Av de simulert i studien var det enten hendelsene med kortest varighet og lavest intensitet eller lengst varighet og høyest intensitet som resulterte i de laveste NSE-verdiene (Russwurm mfl., 2018).

Sammenlignes resultatene for Modell 1 og 3 i Tabell 4.6, gir begge volumfaktorer i nærheten av det optimale og det varierer hvilken modell som til en hver tid gir de beste resultatene. NSE-verdiene for Modell 1 er betydelig bedre enn for Modell 3. Gode resultater i kombinasjon med logisk modelloppbygning, gjør derfor at Modell 1 bør benyttes som tilnærming med fokus på Trinn 2.

4.3 Historiske og fremtidige regn

4.3.1 Historiske regn

I analysen som ble utført for å finne hvilken modell som hadde resultater nærmest de observerte med hensyn til totalavrenning, endte Modell 4 opp som den foretrukne kandidaten for lange regnserier. For å beregne gjennomsnittlige volum-avrenningskoeffisienter ble de historiske regnseriene fra Blindern målestasjon satt sammen til én lang hendelse og kjørt for Modell 4 med minimumsverdier for jordlagstykkelse. Resultatene fra simuleringen er presentert i Tabell 4.7.

Tabell 4.7: Nedbør, avrenning og gjennomsnittlige avrenningskoeffisienter generert fra simuleringer basert på historiske måledata fra Blindern.

	Totalnedbør [mm]	Totalavrenning [mm]	Volum-avrenningskoeffisient [-]
Blågrønt tak	9388,2	6231,1	0,664
Grønt tak	9388,2	7010,7	0,747
Midlere	9388,2	6340,8	0,675

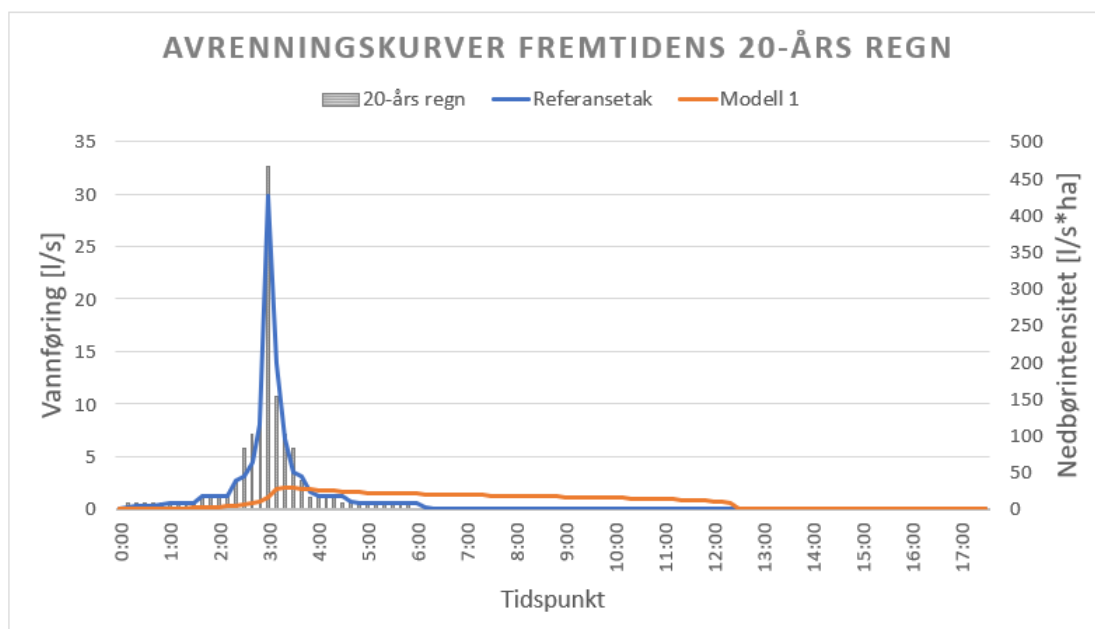
Volum-avrenningskoeffisienten indikerer graden av retensjon på taket. En verdi på 0,66 tilsvarer en gjennomsnittlig retensjon på 34%. Resultatene viser at det blågrønne taket har større evne til å holde tilbake vann enn det grønne.

Studier som tar for seg gjennomsnittlig retensjonsevne for grønne tak er godt representert i litteraturen. I disse kommer det frem at viktige faktorer som påvirker evnen til å tilbakeholde vann er strukturen og oppbygningen på taket, de klimatiske forholdene og mengden og intensiteten på nedbøren (Cipolla mfl., 2016). Selv om tykkelsen på substratet bidrar til økt retensjon, er ikke gevinsten nødvendigvis så stor. En studie i USA konkluderte i sitt forsøk med at en økning i tykkelse fra 2-15cm kun gav en økning i volumretensjon på 14% (Scholtz-Barth, 2001). Dette kan være årsaken til at retensjonsevnen til det grønne taket på Vega Scene ikke er vesentlig dårligere enn for det blågrønne taket. Flere studier peker på at massenes hydrauliske egenskaper og fuktighetsinnhold er av større betydning (Palla mfl., 2010).

Et nylig publisert doktorgradsarbeid fra Trondheim sammenlignet hvordan oppbyggingen av ulike fordrøyningsstak påvirket retensjonsevnen. Blant annet ble et grønt tak med 30mm tykke sedummatter og et vegetert tak med et 100mm tykt løsmasselag bestående av LECA sammenlignet og vurdert. Langtidssimuleringer resulterte i en retensjonsevne mellom 24-37% for de to takene (Hamouz, 2020). Andre studier utført for grønne tak med substratdybder >100mm i Portland (Spolek, 2008, Hutchinson mfl., 2003), Seattle (Berkompas, 2008) og New York (Carson mfl., 2013) resulterte i fordrøyningssevner mellom 12 og 69%.

4.3.2 Fremtidige regn

Det konstruerte symmetriske blokkhyetogrammet presentert i Figur 3.9 ble lagt inn 1.juli et tenkt år i fremtiden. Regnet ble kjørt for Modell 1, samt et tradisjonelt svart tak for sammenligning. Resultatene, presentert i Tabell 4.8 og Figur 4.12, viser at referansetakets genererte en bratt avrenningstopp på nesten 30 l/s. Avrenningskurven for Modell 1 var mye flatere, og vannet brukte omlag dobbelt så lang tid på å renne av taket. Avrenningstoppen for denne kurven var i underkant av 2 l/s og ble dermed redusert med over 93%. Totalvolumet ble redusert med ca 20%. Utelates det grønne taket i modellen viser resultatene at flomtappen ble redusert med nesten 95%, og totalvolumet med 21%. Modellen ble kalibrert for å stemme godt for maksimalavrenning, og resultatene for totalavrenning er derfor mindre pålitelige.



Figur 4.12: Avrenningskurver for fremtidens 20 års regn. Den oransje linja representerer avrenningsforløpet simulert med Modell 1, mens den blå linja representerer et tradisjonelt svart tak. De grå søylene i bakgrunnen visualiser intensiteten til det dimensjonerende regnet.

Tabell 4.8: Maksimal og total avrenning for et fremtidig 20 års regn både for den samlede modellen og det blågrønne taket alene.

	Begge tak		Kun blågrønt	
	Maks. [l/s]	Total [m ³]	Maks. [l/s]	Total [m ³]
Modell 1	1,99	45,72	1,30	39,55
Referansetak	29,9	57,80	25,9	50,00

Det fremtidige regnet ble også kjørt på høsten, men dette viste seg å ha minimal påvirkning på den maksimale avrenningen. Studier gjennomført av grønne tak antyder

Tabell 4.9: Maksimal avrenning, dimensjonerende intensitet og beregnede avrenningskoeffisienter for den konstruerte 20-års hendelsen med klimafaktor.

	Areal [ha]	Maksimal avrenning [l/s]	Dimensjonerende nedbørintensitet [l/s*ha]	Spissavrenningskoeffisient [-]
Hele taket	0,0801	1,99	24,8	0,08
Blågrønt tak	0,06925	1,30	18,8	0,07

at jordmasser med høyt innhold av vann har mindre kapasitet til å holde tilbake nedbør (Palla mfl., 2010), og den maksimale avrenningen ville trolig være enda høyere dersom massene var mettet ved regnstart.

I Tabell 4.9 er maksimal avrenning delt på dimensjonerende regnintensitet for samme regnvarighet for å finne spissavrenningskoeffisienter. Samlet oppnår taket en spissavrenningskoeffisient på 0,08, mens verdien for det blågrønne taket alene er 0,07. Sammenlignet med verdiene oppgitt i Tabell 2.1 ligger de beregnede koeffisientene for taket på Vega Scene lavere enn både "Skogsområder" og "Dyrket mark og parkområder". Taket har, basert på denne verdien, et stort potensiale med tanke på reduksjon av spissavrenning.

4.4 Usikkerhet

Forenklinger og avvik

Resultatene og deres nøyaktighet påvirkes av ulike faktorer. I modellene ble det gjort en del forenklinger og antakelser, blant annet om homogene masser, midlere lagdybde og en konstant verdi for effektiv porøsitet. I virkeligheten består massene på taket av lag med ulike dybder og egenskaper, som vil gjøre utslag på hvordan og tiden det tar før nedbøren når sluket. Den midlere verdien for effektiv porøsitet ble valgt for å ta hensyn til at taket kunne være fuktig ved regnstart. Ofte vil taket ved regnstart være våtere eller tørrere enn denne verdien antyder. Stedlig variasjon og vannets utbredelse på taket ble i liten grad tatt hensyn til. Modellene med lagringsenhet antok en entydig sammenheng mellom vannstand og vannføring. De faktiske forholdene på taket tilsier at taket har en egen dynamikk og fordelingen av vann vil dermed avhenge mer av regnets intensitet og varighet.

Forenklinger og generaliseringer kan spare tid, men vil også kunne føre til større avvik i modellen. Avingen mellom logiske forenklinger og akseptable avvik er derfor noe som er gjort med hensyn til modellens formål og bruksområde. For å redusere usikkerheten kan det utføres kontrollerte oppfyllingsforsøk med vann på taket. Da vil massenes infiltrasjonsevne kunne beskrives mer nøyaktig, og betydningen av jordas fuktighetsinnhold bestemmes. I tillegg vil det være mulig å måle tilrenningstid fra ulike punkter til sluk.

Data

Datasettene med målinger for nedbør og vannføring går kun ett år tilbake i tid. Modellen ble derfor sterkt påvirket av hvordan variasjonen i temperatur og nedbør var akkurat dette året. Hadde dataseriene gått lengre tilbake i tid kunne man i større grad kunnet utforme modellene basert på månedlige gjennomsnittsverdier, og fått mer pålitelige resultater. Dette gjelder spesielt i forhold til Trinn 1-modellen. Som det kommer frem av Figur 3.8 var 2020 et år uten de virkelig store regnhendelsene. Det kan derfor argumenteres for at modellen som er valgt ut til tilnærming av takets håndtering for de store hendelsene kun er gyldig for regn med gjentakintervall opp mot 5 år. Om modellen fungerer like godt for dimensjonerende hendelser på for eksempel 20 år, er derfor usikkert, og dette bør tas i betraktning om modellen skal benyttes til planlegging og dimensjonering ved regn av slik intensitet.

De korte dataseriene gjør også at det er vanskelig å si noe om langtidseffekten til taket, og om fordrøyningssevnen vil svekkes med tiden. Modellen vil også kunne påvirkes av dette, og de beregnede vannføringene vil ikke nødvendigvis stemme for tak som allerede har vært i drift i flere år.

Siden vannføringen som måles av NVE er summen av avrenningen fra det blågrønne og grønne taket, er det vanskelig å si hvor godt modellen vil stemme dersom det grønne taket neglisjeres.

Modellresultater sammenlignet med manuelle beregninger

I sine manuelle beregninger kom Paus og Alne (2018) frem til at maksimal vannføring fra taket ved nedbør med 20 års gjentakintervall, varighet 180 minutter og klimafaktor 1,4 for et takareal på 650m² og 3 stk. strupede taknedløp var 0,95 l/s.

Modell 1, som er modellen som stemte best overens med de observerte spissavrenningene, gir, som vist i Tabell 4.8, en spissavrenning på 1,3 l/s fra det blågrønne taket alene ved en konstruert 20-års hendelse med klimafaktor 1,4. Denne hendelsen forutsetter en effektiv porøsitet for løsmassene på 0,35 og spissavrenningen ville vært høyere dersom massene var mettet ved regnstart. Arealet på taket som benyttes i simuleringene er om lag 7% større enn i de manuelle beregningene. I tillegg er den maksimale avrenningen et resultat av akkumulert nedbør fra en konstruert hendelse med 20-års gjentakintervall og varighet 6 timer. Dette hyetogrammet tar utgangspunkt i at 20-års hendelsen inntreffer for alle varigheter. Dette er urealistisk og fører til at det faktiske gjentakintervallet for hendelsen er langt høyere enn 20 år. Siden Modell 1 presenterer verst tenkelig scenario, kan det tyde på at modellresultatene stemmer godt med de manuelle beregningene. Dette er likevel et forhold som krever mer utredning.

4.5 Overførbarhet til lignende prosjekter

Det er ingen grunn til å tro at oppsettet av modellene vil gi dårlige resultater for lignende tak. Rekkefølgen på komponentene i SWMM-modellene er den mest logiske, også for tak med annen størrelse og utforming. En tilpasning av modellen for nye situasjoner vil uansett være nødvendig. Tykkelsen på jordlaget, geometrien på taket og kurvene som beskriver forholdet mellom vannstand, areal og vannføring må byttes ut mellom hvert prosjekt. Data for nedbør og temperatur må hentes ut og lastes inn for det aktuelle området. Om det gjøres en grundig jobb med innhenting og beregning av disse, vil mye av usikkerheten fjernes.

De viktigste erfaringsverdiene generert fra denne studien er takets påregnelige retensjonsevne og kapasitet til å redusere spissavrenning ved store hendelser. Disse verdiene påvirkes av en rekke faktorer. Som en naturlig konsekvens vil tiltakets evne til å holde tilbake nedbør øke med takets areal. En studie utført for å kartlegge helningens effekt på fordrøyningen for grønne tak, konkluderte med at bratte tak hadde dårligere retensjonsevne enn slake (Getter mfl., 2007). Økt dybde på det magasinerende sjiktet har også tidligere i denne oppgaven blitt pekt på som en svak, men medvirkende, årsak til økt retensjon (Scholtz-Barth, 2001). Masser med god infiltrasjonsevne og høy porøsitet vil ha en positiv effekt på takets evne til å lagre og videreføre vann (Leca, 2019). I tillegg vil slukanordning og mengderegulering være av stor betydning for blågrønne tak.

I planleggingen av lignende tiltak må faktorene nevnt ovenfor tas i betraktning og den forventede effekten justeres etter de gjeldende strukturelle forholdene på taket. I tillegg vil de klimatiske forholdene og intensiteten på nedbøren påvirke massenes hydrauliske ledningsevne og fuktighetsinnhold (Cipolla mfl., 2016), som igjen er bestemmende for graden av retensjon.

Ved å gjennomføre tilsvarende studier for lignende tak vil påvirkningen av de ulike faktorene kunne kartlegges og tallfestes. Resultatene fra studiene vil også kunne sammenlignes og på den måten bidra til kvalitetssikring av funnene som er gjort i denne oppgaven. Dersom modellene viser seg å være pålitelige og erfaringsverdiene overførbare, kan en slik tilnærming være et tidsbesparende og nyttig verktøy. Erfaringsverdiene vil kunne brukes i utviklingen av fremtidige blågrønne tak og det vil bli enkelt å finne ut om kravene satt av offentlige instanser vil kunne overholdes.

5. Konklusjon

5.1 Konklusjon

Forskningsspørsmålene har blitt besvart gjennom vurdering av og resultater fra modellene. Konklusjonene som er trukket baserer seg på erfaringene gjort på Vega Scene, og er ikke nødvendigvis overførbare til tak med annen geometri, utforming og beliggenhet. Potensielle målefeil i datasettene, forenklinger gjort i modell og eventuelle feilkilder i kalibrering- og verifiseringsprosessen må tas i betraktning når resultatene tolkes og brukes videre. Siden modellene kun er kalibrert og verifisert for ett punkt i avrenningsprosessen kan de ha avvikende resultater for lokale prosesser som finner sted på takene.

Gode grunnlagsdata har vært essensielt for en realistisk modell. Kjente verdier for areal og helning, samt strupeanordningens vinkling og geometri har derfor hatt en stor betydning for modellenes kvalitet. Ukjente verdier måtte enten hentes ut fra litteratur eller tilnærmes ut fra den enkelte parameterens funksjon og formål. Det ble tidlig klart at det med mulighetene som fantes i programmet ble utfordrende å lage én modell som kunne beskrive takets ytelse for alle typer regn. Følgelig ble det utformet én modell for de hverdagslige regnene(Trinn1), og én modell som beskrev tilbakeholdelsen av vann ved store, intensive hendelser(Trinn2).

Kalibreringen ble utført manuelt, for én parameter av gangen. Simuleringer ble kjørt for min-, maks- og middelverdier, hvorav middelverdien ble brukt som referanse. Modellene for de mindre hendelsene ble kalibrert med hensyn til total vannføring, mens det var viktigst å optimalisere for maksimal vannføring i modellene for de store hendelsene. I sistnevnte alternativ ble også verdier for NSE og total vannføring vektlagt. I alt ble åtte store hendelser plukket ut til vurdering av Trinn 2-modellen, fire til kalibrering og fire til verifisering. De mest kritiske parameterene for vannføringen var jordlagstykkelse, gropmagasinering og overflateruhet.

Modell 4 resulterte i den beste tilnærmingen med hensyn på Trinn 1. Modellens oppbygning kombinerte bruk av programmets innebygde LID-modul med lagringsenheter og restriktorer. Modellen oppnådde en gjennomsnittlig volumfaktor på 1,0 for total vann-

føring, men det kan argumenteres for at faktoren så ut til å variere systematisk med årstid. En regnserie på om lag 10 år ble kjørt gjennom modellen og resulterte i en gjennomsnittlig retensjonsevne på 34% for det blågrønne taket.

For Trinn 2 gav Modell 1 de beste resultatene. Utgangspunktet for denne modellen var tette tak hvor lagringskapasiteten utelukkende ble beskrevet ut i fra takets og strupeanordningens geometri. Fordampningen måtte tilnærmes ved justering av parameterene for gropmagasinerings og overflateruhet. Resultatene ble betydelig forbedret etter kalibrering, og den gjennomsnittlige volumfaktoren var 1,04 for alle de åtte hendelsene. Det var store variasjoner i NSE mellom hendelsene, og kun 2 av 8 resulterte i verdier $> 0,5$ etter kalibrering. Et symmetrisk blokkhyetogram med 20 års gjentaksintervall, klimafaktor 1,4 og varighet 6 timer ble kjørt gjennom modellen. Sammenlignet med et tradisjonelt svart ble den maksimale avrenningen redusert med nesten 95%. Simuleringen av dette regnet resulterte i en spissavrenningskoeffisient på 0,07 for det blågrønne taket.

Overførbarheten til andre prosjekter antas å være god dersom det gjøres en grundig jobb med innhenting av grunnlagsdata og beregning av forholdskurver. Graden av retensjon påvirkes av både strukturelle forhold på taket, klimatiske aspekter og nedbørens intensitet. Endring i størrelse og helning, valg av masser og dybde på det magasinerende sjiktet vil kunne ha innvirkning på fordrøyningssevnen. I planleggingen av lignende tak må disse faktorene tas i betraktning og den forventede effekten justeres etter forholdene.

5.2 Videre arbeid

SWMM-modellene i denne studien er laget og kalibrert for og mot ett spesifikt sted. Ved å gjennomføre lignende studier for tak med ulike strukturelle og klimatiske forutsetninger, vil det være mulig å teste ut modellenes overførbarhet. Alle regnhendelsene i studien har gjentaksintervall ≤ 5 år. Det kunne vært interessant å undersøke modellenes egnethet for hendelser større enn det de i utgangspunktet er kalibrert for. For å oppnå bedre samsvar med det observerte avrenningsforløpet og høyere verdier for NSE, kan andre parametere velges ut til kalibrering. Massenes hydrauliske egenskaper og fuktighetsinnhold trekkes frem som mulige faktorer av betydning.

I denne studien har det ikke vært mulig å sammenligne målte og observerte verdier for det blågrønne taket alene. Det er derfor usikkert hvor stor betydning det grønne mesanintaket har hatt å si for resultatene. For å utelukke større usikkerheter, kan det med fordel utføres flere studier som ene og alene fokuserer på blågrønne tak. Usikkerheten kan også reduseres ved å utføre kontrollerte oppfyllingsforsøk med vann på taket. Dette vil gi ytterligere informasjon om massenes hydrauliske egenskaper.

Referanser

- Allen, D. M., Cannon, A. J., Toews, M. W. og Scibek, J. (2010). Variability in simulated recharge using different GCMs. *Water Resources Research* 46 (10). DOI: [10.1029/2009WR008932](https://doi.org/10.1029/2009WR008932).
- Andenæs, E., Kvande, T., Muthanna, T. M. og Lohne, J. (2018). Performance of blue-green roofs in cold climates: A scoping review. *Buildings* 8 (4). DOI: [10.3390/buildings8040055](https://doi.org/10.3390/buildings8040055).
- Andenæs, E., Engebø, A., Time, B., Lohne, J., Torp, O. og Kvande, T. (2020). Perspectives on quality risk in the building process of blue-green roofs in Norway. *Buildings* 10 (10): 1–18. DOI: [10.3390/buildings10100189](https://doi.org/10.3390/buildings10100189).
- Berkompas, B. (2008). A study of green roof hydrologic performance in the cascadia region. *International Low Impact Development Conference*.
- Braskerud, B. C. (2014). *Grønne tak og styrtregn. Effekten av ekstensive tak med sedumvegetasjon for redusert avrenning etter nedbør og snøsmelting i Oslo*.
- Braskerud, B. C. (2017). Slik håndterer Oslo kommune overvann i planer og byggesaker.
- Brunner, G. W. og CEIWR-HEC (2016). HEC-RAS River Analysis System User's Manual. US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center. (January): 1–790. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>.
- Burszta-Adamiak, E. og Mrowiec, M. (2013). Modelling of Green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science and Technology* 68 (1): 36–42. DOI: [10.2166/wst.2013.219](https://doi.org/10.2166/wst.2013.219).
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R. og Markhus, E. (1997). Anvendt urbanhydrologi. *Norges vassdrags- og energidirektorat* (10): 193. URL: http://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf.
- Carson, T. B., Marasco, D. E., Culligan, P. J. og McGillis, W. R. (2013). Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: Observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters* 8 (2). DOI: [10.1088/1748-9326/8/2/024036](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024036).
- Castiglia Feitosa, R. og Wilkinson, S. (2016). Modelling green roof stormwater response for different soil depths. *Landscape and Urban Planning* 153. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2016.05.007](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.007).
- Cipolla, S. S., Maglionico, M. og Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering* 95: 876–887. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.009).
- Cole, R. J. og Valdebenito, M. J. (2013). The importation of building environmental certification systems: International usages of BREEAM and LEED. *Building Research and Information* 41 (6). DOI: [10.1080/09613218.2013.802115](https://doi.org/10.1080/09613218.2013.802115).

- Currie, B. A. og Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems* 11 (4). DOI: [10.1007/s11252-008-0054-y](https://doi.org/10.1007/s11252-008-0054-y).
- Fang, C. F. (2008). Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy and Buildings* 40 (6). DOI: [10.1016/j.enbuild.2007.06.007](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.007).
- Farmer, W., Strzepek, K., Schlosser, C. A., Droogers, P. og Xiang, G. (2011). A Method for Calculating Reference Evapotranspiration on Daily Time Scales. (195): 27. URL: <http://globalchange.mit.edu/>.
- Getter, K. L., Rowe, D. B. og Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31 (4): 225–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. og Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377 (1-2). DOI: [10.1016/j.jhydrol.2009.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003).
- Hamouz, V. (2020). *Retention and detention-based roofs for stormwater management in urban environments in cold climates*.
- Haris, H., Chow, M. F., Usman, F., Sidek, L. M., Roseli, Z. A. og Norlida, M. D. (2016). Urban Stormwater Management Model and Tools for Designing Stormwater Management of Green Infrastructure Practices. I: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bd. 32. 1. DOI: [10.1088/1755-1315/32/1/012022](https://doi.org/10.1088/1755-1315/32/1/012022).
- Hutchinson, D., Abrams, P., Retzlaff, R. og Liptan, T. (2003). Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA. *Greening Rooftops for Sustainable Communities*: 1–18. URL: <http://www.portlandoregon.gov/bes/article/63098%5Cnhttp://www.portlandonline.com/shared/cfm/image.cfm?id=63098>.
- Iversen, T. (2005). Norges klima om 100 år Usikkerheter og risiko: 12. URL: <http://regclim.met.no/presse/download/regclim%20brosjyre2005.pdf>.
- Krebs, G. (2016). Spatial Resolution and Parameterization of an Urban Hydrological Model. (June 2016). DOI: [10.13140/RG.2.2.33118.84800](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33118.84800).
- Leca (2019). *LECA Technical Guide*.
- Lee, J. G., Nietch, C. T. og Panguluri, S. (2017). SWMM Modeling Methods for Simulating Green Infrastructure at a Suburban Headwatershed: User's Guide. *U.S. Environmental Protection Agency* (October): 157. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100TJ39.PDF?Dockkey=P100TJ39.PDF%0A>.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. og Aaby, L. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*: 79.
- Lindholm, O. (2018). Håndtering av overvann LOD. *VA/Miljø-blad nr. 125*: 11 s. URL: <http://www.va-blad.no/wp-content/uploads/2018/06/Blad-125-31.05.18.pdf>.
- Meteorologisk institutt (2020). *Historikk Blindern målestasjon*. URL: <https://www.yr.no/nn/historikk/tabell/0-671/Noreg/Oslo/Oslo/Yr.no?q=siste-13-m%C3%A5nader>.
- Miljøverndepartementet (2013). Faglig råd for bærekraftig byutvikling.
- Nash, J. E. og Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3). DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Norsk klimaservicesenter (2021). *IVF-statistikk Blindern målestasjon*. URL: <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN18701>.

- Oslo kommune (2017). *Overvannshåndtering - En Veileder for utbygger*. Tekn. rapp.: 1–31.
- Palla, A., Sansalone, J. J., Gnecco, I. og Lanza, L. G. (2011). Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. *Water Science and Technology* 64 (3): 766–773. DOI: [10.2166/wst.2011.171](https://doi.org/10.2166/wst.2011.171).
- Palla, A., Gnecco, I. og Lanza, L. G. (2010). Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. *Water (Switzerland)* 2 (2): 140–154. DOI: [10.3390/w2020140](https://doi.org/10.3390/w2020140).
- Paradis, C. J., McKay, L. D., Perfect, E., Istok, J. D. og Hazen, T. C. (2018). Push-pull tests for estimating effective porosity: expanded analytical solution and in situ application. *Hydrogeology Journal* 26 (2). DOI: [10.1007/s10040-017-1672-3](https://doi.org/10.1007/s10040-017-1672-3).
- Paus, K. H. (2016). Hydraulisk vurdering av fordrøyning av overvann på tak.
- Paus, K. H. og Alne, I. (2018). *VURDERING AV GRØNT TAK FOR FORDRØYNING*. Tekn. rapp. Aspan Viak: 1–11.
- Paus, K. H. (2020). Forslag til formelverk og sjablongverdier for å anslå areal til naturbaserte overvannstiltak: 233.
- Rossman, L. A. (1975). Storm Water Management Model User'S Manuel. Version Ii. *Environ Prot Technol Ser EPA* (670 /2-75-017).
- Russwurm, I., Gissvold Johannessen, B., Gragne, A., Lohne, J. og Muthanna, T. M. (2018). Modelling Green Roof Detention Performance in Cold Climates. 3: 1804–1793. DOI: [10.29007/4rp8](https://doi.org/10.29007/4rp8).
- Scholtz-Barth, K. (2001). Green roofs: Storm water management from the top down. *Environmental Design and Construction*.
- Shamsi, U. M. og Koran, J. (2017). Continuous Calibration. *Journal of Water Management Modeling*: 1–9. DOI: [10.14796/jwmm.c414](https://doi.org/10.14796/jwmm.c414).
- Sivle, A. (2020). *Byge*. URL: <https://snl.no/byge>.
- Skaaraas, H., Hansen, A.-J., Riise, E., Stenersen, J., Refling, D., Johansen, R., Hjelle, H., Ebeltoft, M., Skofteland, H. og Kipperberg, G. (2015). Overvann i byer og tettsteder. *Norges Offentlige Utredninger*: 276. URL: www.fagbokforlaget.no/offpub.
- Spolek, G. (2008). Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems* 11: 349–359. DOI: [10.1007/s11252-008-0061-z](https://doi.org/10.1007/s11252-008-0061-z).
- Statens vegvesen (2014). *Håndbok N200 - Vegbygging - NORMAL*: 528.
- Stavseth, M. R. (2020). Sensitivitetsanalyser-hvor robust er resultatet? *Tidsskrift for den Norske Laegeforening* 140 (8): 1–2. DOI: [10.4045/tidsskr.20.0099](https://doi.org/10.4045/tidsskr.20.0099).
- Thompson, D. B. (2006). The Rational Method. *Engineering Hydrology* (January).
- Van Renterghem, T. og Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment* 44 (5). DOI: [10.1016/j.buildenv.2008.07.013](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.013).
- Vegdirektoratet (2019). *Håndbok V240 Vannhåndtering*. (Høringsutkast).
- Ødegaard, H. (2014). *Vann- og avløpsteknikk*.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway