



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi

Kalibrering og validering av SWMM- modell for grønt tak på Vega Scene ved bruk av maskinlæring

Calibration and validation of SWMM-model for
green roof at Vega Scene using machine learning

Johannes Devik
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne oppgaven er skrevet våren 2023 og markerer slutten på min mastergrad i Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU).

Det har vært en lærerik studietid, som student i både Ås og Trondheim. Og jeg ser nå fram til nye utfordringer.

Arbeidet med masteroppgaven har vært krevende og lærerikt. Takk til medstudenter og familie for godt humør og støtte som bidro til å gjøre dette til en fin periode.

Jeg vil også takke min veileder, Kim Haukeland Paus ved NMBU, for gode tilbakemeldinger og innspill.

Johannes Devik

Ås, mai 2023

Sammendrag

Håndtering av overvann ved bruk av naturbaserte løsninger har hatt en stor utvikling den senere tid. En rekke kommuner i Norge har nå krav til at overvannet skal håndteres åpent og lokalt på egen tomt. I den sammenheng ble taket på Vega Scene i Oslo kommune bygd som et grønt tak, med restriktorer ved utløpet for å holde tilbake avrenningen fra taket i enda større grad.

Erfaringsgrunnlaget rundt denne type løsninger er begrenset da kombinasjonen av grønt tak og restriktorer ikke er en løsning som er utbredt.

I denne oppgaven ble det lagd en modell i SWMM (Storm Water Management Model) for det grønne taket på Vega Scene for å beskrive sammenhengen mellom nedbør og avrenning. En sensitivitetsanalyse ble gjennomført, og 8 parametere ble valgt ut til kalibrering. Både kalibrerings- og valideringsperioden er på 8 sammenhengende måneder, og perioder med snø og snøsmelting er ikke benyttet. Modellen kalibreres ved bruk av global optimalisering ved hjelp av differensiell evolusjon. Den kalibrerte modellen ble benyttet til å lage en QVF (avrenning-varighet-frekvens) statistikk for Vega Scene ved bruk av historisk nedbør. Simulert QVF statistikk sammenlignes med IVF (intensitet-varighet-frekvens) statistikk for nedbør, samt generelle grenser for påslipp til offentlige overvanns- og fellesledninger i Oslo kommune.

Resultatene av kalibreringen ga gode resultater med en KGE (Kling-Gupta efficiency) på 0.91 for kalibreringsperioden og 0.86 for valideringsperioden. Simulert QVF statistikk ligger tydelig lavere enn IVF statistikken ved kortere varigheter. Spissavrenningen, sammenlignet med det man kan forvente fra tradisjonelle tak, er dermed betydelig redusert. For hendelser av lenger varighet er forskjellene mindre. Simulert QVF statistikk sammenlignet med generelle grenser for påslipp til offentlige overvanns- og fellesledninger i Oslo kommune, viser en avrenning fra Vega Scene som ligger for høyt til å overholde grensene.

I videre arbeid anbefales det å se på muligheter for å forbedre beregningen av fordampning i modellen, for å sikre riktige initialbetingelser. I tillegg til å se på muligheter for å simulere perioder med snø og snøsmelting, slik at modellen fungerer gjennom hele året.

Abstract

The handling of stormwater using nature-based solutions has seen a major development in recent times. Several municipalities in Norway now require stormwater to be handled openly and locally on site. In that context, the roof at Vega Scene in Oslo municipality was built as a green roof, with restrictors at the outlet to hold back the runoff from the roof to an even greater extent. The experience base around this type of solution is not that great as the combination of a green roof and restrictors is not a solution that is widespread.

In this assignment, a model was created in SWMM (Storm Water Management Model) for the green roof at Vega Scene to describe the connection between rainfall and runoff. A sensitivity analysis was performed, and 8 parameters were selected for calibration. Both the calibration and validation period are 8 consecutive months, and periods of snow and snow melting are not used. The model is calibrated using global optimization using differential evolution. The calibrated model was used to create a QDF (runoff-duration-frequency) statistic for Vega Scene using historical rainfall. Simulated QDF statistics was compared with IDF (intensity-duration-frequency) statistics for precipitation, as well as general limits for discharge to public stormwater- and combined sewer systems in Oslo municipality.

The results of the calibration gave good results with a KGE (Kling-Gupta efficiency) of 0.91 for the calibration period and 0.86 for the validation period. Simulated QDF statistics are clearly lower than the IVF statistics for shorter durations. The runoff peak, compared to what can be expected from traditional roofs, is thus significantly reduced. For events of longer duration, differences are smaller. Simulated QDF statistics compared to general limits for discharge to public stormwater- and combined sewers systems in Oslo municipality show a runoff from Vega Scene that is too high to comply with the limits.

In further work, it is recommended to look at possibilities to improve the calculation of evaporation in the model, to ensure correct initial conditions. In addition to looking at possibilities to simulate periods of snow and snowmelt, so that the model works throughout the year.

Innhold

FORORD.....	I
SAMMENDRAG	II
ABSTRACT	III
INNHold.....	IV
FIGURER.....	V
TABELLER	VI
1 INTRODUKSJON.....	1
1.1 BAKGRUNN.....	1
1.2 OPPGAVENS MÅL	2
2 METODE.....	3
2.1 VEGA SCENE.....	3
2.2 INNSAMLING AV DATA	4
2.3 MODELL I SWMM.....	5
2.3.1 LID-modul.....	6
2.3.2 Oppbygging av lagringsenhet	7
2.3.3 Avrenningskurve i restriktor:	9
2.4 SENSITIVITETSANALYSE.....	10
2.5 KALIBRERING OG VALIDERING.....	12
2.6 QVF OG GRENSER FOR PÅSLIPP	13
3 RESULTATER OG DISKUSJON	14
3.1 SENSITIVITETSANALYSE.....	14
3.2 KALIBRERING OG VALIDERING.....	17
3.2.1 Spissavrenning, med fokus på restriktorens påvirkning.....	18
3.2.2 Lavere avrenningstopper.....	20
3.2.3 Høy simulert avrenning.....	21
3.2.4 Kort mot lang nedbør	23
3.3 SIMULERT QVF, IVF OG PÅSLIPSMENGDER	24
4 KONKLUSJON.....	26
4.1 VIDERE ARBEID.....	27
REFERANSER	28
VEDLEGG A	30
VEDLEGG B	31
VEDLEGG C	34
VEDLEGG D	35

Figurer

Figur 2.1: Vega Scene sett ovenfra. Foto: (Asplan Viak).....	3
Figur 2.2. Oppbygningen av modellen i SWMM, med benyttet LID modul for grønne tak.	5
Figur 2.3. Vanddekt areal på hovedtaket ved vannstand 40, 80 og 120 mm. Illustrasjon: (Myhr, 2021).....	8
Figur 2.4. Strupeanordningen for hovedtaket. Illustrasjon fra: (Paus, 2016).....	9
Figur 2.5. Avrenningskurve for hovedtaket.	10
Figur 3.1. Sensitivitetsanalyse volumavrenning 01.04.20-01.12.2020. Ny volumavrenning ved endret parameterverdi delt på volumavrenning ved initialverdi for parametere på y-aksen. Mot ny parameterverdi delt på opprinnelig parameterverdi på x-aksen. Parameteren «Conductivity» var satt med et stort intervall, og fortsetter et stykke videre utenfor figuren med lavere og lavere stigning.	15
Figur 3.2. Sensitivitetsanalyse spissavrenning 26.10.20. Ny spissavrenning ved endret parameterverdi delt på spissavrenning ved initialverdi for parametere på y-aksen. Mot ny parameterverdi delt på opprinnelig parameterverdi på x-aksen. Parameteren «Conductivity» var satt med et stort intervall og fortsetter videre ut av figuren, men har stabilisert seg og fortsetter helt flatt.	15
Figur 3.3. Spissavrenning i kalibreringsperioden, høyeste for både kalibrerings og valideringsperioden.	19
Figur 3.4. Avrenning i kalibreringsperioden, spissavrenning for hele perioden. Med simulert avrenning fra kalibrert modell hvor restriktorene ble fjernet fra SWMM-modellen.	20
Figur 3.5. Eksempel på lavere avrenningstopp i valideringsperioden.	21
Figur 3.6. Avrenning i valideringsperioden, med regn i forkant.....	22
Figur 3.7. Kort og intens nedbørshendelse i valideringsperioden.....	23
Figur 3.8. Langvarig nedbørshendelse i valideringsperioden.	24
Figur 3.9. Logaritmisk sammenligning av IVF statistikk, simulert QVF statistikk fra Vega Scene og generelle påslippstillatelser.	25

Tabeller

Tabell 2.1. Initialverdier for LID modulene i SWMM.	7
Tabell 2.2. Initialverdier i lagringsenheten.	9
Tabell 2.3: Oversikt over formler benyttet for utregning av avrenningskurve.	9
Tabell 2.4. Forklaring av parametere brukt i Tabell 2.3.	10
Tabell 2.5. Parametere brukt i sensitivitetsanalyse med minimums-, maksimums- og initialverdi.	11
Tabell 3.1. Verdier tatt med til kalibrering på bakgrunn av sensitivitetsanalyse	16
Tabell 3.2. Kalibrerte parameterverdier	17
Tabell 3.3. KGE og BIAS for kalibrering og validering.....	17

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Overvann, som skyldes avrenning fra nedbør og snøsmelting, er noe som kan skape store utfordringer i tettsteder og byer dersom håndteringen av dette ikke er tilstrekkelig planlagt for. I byer med en stor andel med impermeable overflater, som tradisjonelle tak og asfalt, vil en mindre andel vann infiltreres og/eller fordampes og det trengs dermed systemer for å håndtere overvannet. Tradisjonelt har dette hovedsakelig blitt løst ved å lede overvannet til rør, både til egne overvannsrør og til fellesledninger. Man er da avhengig av ha god nok kapasitet på løsningene, men flere steder er det i dag kapasitetsutfordringer ved kraftigere nedbør. Noe som gir uønskede konsekvenser som problemer knyttet til skade på bygg, helse og miljø. Årlig skadekostnader knyttet til dette er anslått til å være 1.6 – 3.6 milliarder per år (NOU 2015: 16, 2015). Både en ytterligere fortetning, og forventet endring i nedbør i framtiden, er faktorer som bidrar til økt avrenning og ytterligere utfordringer hvis det ikke planlegges nye tiltak for å bøte på dette.

I senere tid har det blitt mer fokus på å håndtere overvann lokalt, og «Statlige planretningslinjer for klima- og energiplanlegging og klimatilpasning (2018)» sier blant annet at overvann ved utbygging i hovedsak skal håndteres naturbasert. På bakgrunn av dette har flere kommuner krav om overvannshåndtering som imøtegår dette. Eksempelvis Oslo kommune som har laget en veileder for overvannshåndtering hvor hovedprinsippene går ut på å minimere overvann til offentlig avløpsnett og fortrinnsvis håndtere alt overvann åpent og lokalt (Oslo kommune, 2017).

På bakgrunn av utfordringer knyttet til tradisjonell overvannshåndtering, nye krav og andre positive effekter ved naturbaserte løsninger, er det en stor utvikling når det kommer til å utvikle løsninger for å håndtere overvann åpent og lokalt. Noen løsninger, som grønne tak og regnbed, har blitt tatt i bruk i økende grad. Det finnes flere studier på grønne tak, blant annet en langtidsmodellering av Cipolla et al. for et grønt tak for å vurdere den hydrologiske effekten. Der SWMM (Storm Water Management Model) med LID (low impact development) moduler ble tatt i bruk (Cipolla et al., 2016). SWMM er et nedbør-avrennings verktøy som i hovedsak brukes i urbane områder, og inneholder en rekke LID moduler som kan brukes til å modellere og evaluere infrastruktur, inkludert moduler for naturbaserte løsninger som grønne tak og regnbed (Rossmann, 2015). I modelleringen ble det oppnådd gode simuleringsresultater etter kalibrering av modellen, og det ble konkludert med at SWMM med bruk av LID moduler kan være egnet til å evaluere effekten til grønne tak (Cipolla et al., 2016). En annen studie av Hamouz og Muthanna for grønt tak i kaldt klima, ved bruk av SWMM, konkluderte med gode

simuleringsresultater for kalibrerings- og valideringsperioden. Men med dårligere resultater når det kommer til snøsmelting, dermed ble det pekt på behov for mer forskning på avviket knyttet til vinteren (Hamouz & Muthanna, 2019). Erfaringsgrunnlaget rundt grønne tak begynner med dette å bli større, men det er fortsatt et behov for mer erfaringsinnhenting rundt naturbaserte løsninger da dette er et felt i utvikling.

For å imøtegå krav fra kommunen ble taket på Vega scene i Oslo bygd som et såkalt blågrønt tak. Taket har de samme egenskapene og utformingen som grønne tak, men skiller seg fra tradisjonelle grønne tak ved å ha en restriktor ved utløpet på taket. Dette for å strupe mengden vann som renner ut, og på denne måten lagre og fordrøye en større del av nedbøren, med lavere spissavrenning ved store nedbørsmengder. Dette er en løsning som ikke er utbredt innen overvannshåndtering, og taket var det første av sitt slag i Norge (Asplan Viak). Taket er dessuten utstyrt med en rekke måleinstrumenter som muliggjør forskning, blant annet måles avrenningen fra taket.

Det er blitt gjort noen studier av grønne tak med ekstra løsninger for å holde tilbake vann, men dette er fortsatt et område som ikke er blitt undersøkt i stor grad. Myhr gjennomførte en masteroppgave om Vega Scene der en modellering av taket ble gjennomført ved hjelp av SWMM. Det ble utviklet to ulike typer modeller, en for spissavrenning og en for månedlig avrenningsvolum (Myhr, 2021). Mens Jeffers et al. foretok en test av grønt tak med strupet utløp, der kassetter med vegetasjon ble plassert under en nedbørssimulator. En modell ble deretter kalibrert i SWMM, med LID modulene for grønne tak og regnbed, og resultatene ble ansett som gode. Studien var en kontrollert test på et lite område, og det pekes derfor på behovet for å gjennomføre undersøkelser i større skala utendørs (Jeffers et al., 2022).

Felles for nevnte studier er at kalibreringen foregikk ved at parameterne ble endret manuelt. Utviklingen innen optimeringsalgoritmer for å løse komplekse problemer har vært stor, noe som gir gode muligheter innen kalibrering. Og det er blant annet blitt pekt på muligheten for å kalibrere modeller i SWMM ved å benytte programmeringsverktøyet R med pakken Deoptim (Global Optimization by Differential Evolution). Dette er en pakke for global optimering av funksjoner ved hjelp av differensiell evolusjon (Dominik Leutnat, 2019).

1.2 Oppgavens mål

Denne oppgaven har som mål å gjennomføre en studie av taket på Vega Scene, gjennom å ta i bruk global optimalisering ved hjelp av differensiell evolusjon. Dette for å få et bedre erfaringsgrunnlag med tak bygd slik Vega Scene er. Oppgave har også som mål å si noe om

hvordan taket ville håndtert regn i et lenger perspektiv, sett opp mot nedbørsstatistikk og krav som settes fra kommunen.

Oppsummert har oppgaven følgende 3 forskningsmål:

1. Utvikle en modell for Vega Scene i SWMM som beskriver avrenningen fra taket, ved å gjennomføre en kalibrering ved bruk av global optimalisering ved hjelp av differensiell evolusjon.
2. Validere modellen og vurdere hvor god den kalibrerte modellen er.
3. Bruke den kalibrete modellen til å simulere avrenning basert på historisk nedbør, for å sammenligne avrenningen med nedbørsstatistikk, samt generelle grenser for påslipp til offentlige overvanns- og fellesledninger i Oslo kommune.

2 Metode

2.1 Vega Scene

Vega Scene, sett ovenfra i Figur 2.1, er et kulturhus i Oslo kommune. Oppbyggingen er beskrevet nærmere av blant annet Myhr i en masteroppgave fra 2021(Myhr, 2021). Taket består av et stort hovedtak på 692.5 m² som er beplantet med stedefegen vegetasjon. I tillegg har det en mindre mesanin på 108.5 m², der 87.8 m² er grønt og resten teknisk areal.



Figur 2.1: Vega Scene sett ovenfra. Foto: (Asplan Viak).

Hovedtaket ble bygd som et såkalt blågrønt tak, ved at det er et grønt tak med 3 utløp som alle har en strupeanordning for å kontrollere videreført vannmengde. Taket har en helning på 2.5% inn mot slukene, som er plassert på en rekke på midten av taket. Det er også noe helning internt mellom slukene. Strupeanordningen, også kalt restriktor, består av en trekantformet åpning plassert i bunn med en høyde på 25 mm. Mulig videreført vann vil dermed øke med vannstanden på taket, da trykkehøyden øker. Restriktoren er åpen i topp med en diameter på 75 mm, og ved vannstand over 100 mm renner vann ut i dette overløpet. Mesaninen er bygd som et tradisjonelt grønt tak, og utløpet er dermed ikke begrenset på samme måte som hovedtaket og har et utløp med diameter 100 mm i enden av taket. Jorddybden på hovedtaket er av varierende tykkelse, med total jorddybde hovedsakelig mellom 150 mm til 300 mm, med noen terrenghevelser i tillegg der deler er opp til 350 mm. For mesaninen er tykkelsen på for jordlagene mer jevn, omtrent 150 mm. Jordmaterialet er av noe varierende materiale i ulike deler på begge takene, i tillegg til at kantene hovedsakelig består av elvegus.

2.2 Innsamling av data

For modellen i SWMM blir nedbør, avrenning og temperatur innhentet. De første målingene fra Vega Scene er fra 17.01.2020, mens restriktorene fra taket ble fjernet 01.01.2022. Av den grunn ble mulig kalibrerings- og valideringsperiode begrenset til mellom disse datoene. For å få oversikt over snø og snøsmelting sin påvirkning på avrenning i denne perioden ble også snødybder for perioden innhentet. For å simulere historisk avrenning ble historisk nedbør og temperatur fra 2002-2022 innhentet. I tillegg ble IVF (intensitet-varighet-frekvens) statistikk for nedbør innhentet for å sammenligne denne med avrenningen.

Dataen ble hentet inn på følgende måte:

Avrenning:

Observasjoner for avrenning fra Vega Scene (ID: 6.96.0) ble lastet ned i en Excel-fil fra sildre.nve.no, hvor tidsintervallet mellom hver måling er 10 minutter. Den målte vannføringen gjelder avrenningen både fra hovedtaket og den mindre mesaninen. Enkelte verdier for vannføring var negative, og disse ble endret til 0.

Temperatur:

Grunnet at det ikke ligger komplett temperaturdata fra Vega Scene ute på sildre, hentes daglige maksimums- og minimumstemperaturer fra Blindern (SN18700). Målestasjonen ligger i overkant av 3 km unna Vega Scene. Dataen ble lastet ned fra klimaservicesenter.no og lagret i en DAT-fil. Det ble laget en fil for kalibrerings- og valideringsperioden, og en for historisk periode.

Nedbør:

Det ligger ikke komplett data for nedbør fra Vega Scene ute på Sildre, derfor velges nedbørsmålinger tatt ved Sofienberg for kalibrerings- og valideringsperioden. Denne måleren er plassert omtrent 550 meter unna Vega Scene i luftlinje. Nedbørsmålingene fra Sofienberg (SN18315) måler nedbør på 1 minutt intervall, og ble innhentet fra klimaservicesenter.no. Den 29.05.2020 og den 27.07.2021 ble det registrert avrenning fra Vega Scene på Sildre, men det ble ikke registrert nedbør på Sofienberg. Ingen nedbørmålere på klimaservicesenter.no i Oslo målte nedbør 29.05.2020 og derfor settes avrenningen til 0 i observasjonsfilen for denne hendelsen. 27.07.2021 observeres det nedbør ved flere målestasjoner, og data fra Tøyen (SN18310) hentes fra klimaservicesenter.no, da denne målestasjonen er blant de nærmeste til Vega Scene, med omtrent 1300 meter i luftlinje.

Historisk nedbørverdier fra Blindern PLU (SN18701) med tidsoppløsning på 1 minutt ble lastet ned fra frost.met.no. Nedbørsdataene ble lagret i en DAT-fil.

Snødybder

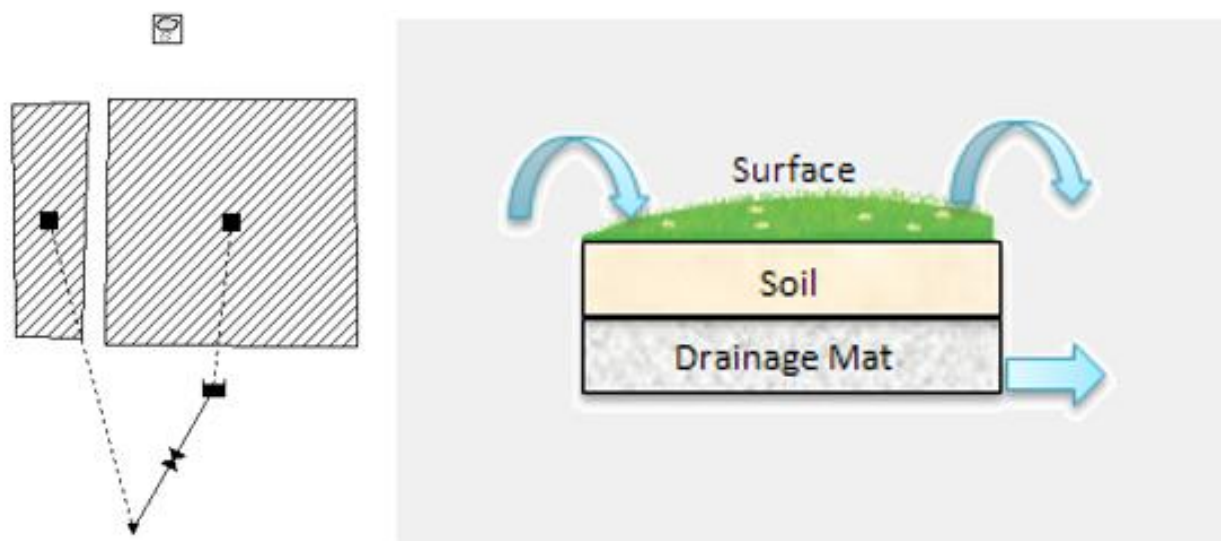
Informasjon om snødybder ble hentet fra Blindern (SN18700) på klimaservicesenter.no.

IVF statistikk

IVF statistikk fra Blindern PLU (SN18701) ble lastet ned fra klimaservicesenter.no. Denne bygger på nedbørsdata fra 1968-2022.

2.3 Modell i SWMM

En modell av taket lages i EPA SWMM 5.1.014 (US Environmental Protection Agency, 2020). Modellen bygges opp ved å lage to delfelt, ett for den lille mesaninen bestående av grønt tak uten restriktor, og ett for det store hovedtaket med restriktorer. Oppbyggingen av modellen i SWMM, samt LID modulen, vises i Figur 2.2.



Figur 2.2. Oppbyggingen av modellen i SWMM, med benyttet LID modul for grønne tak.

LID-modulen for grønne tak, ble benyttet for begge takene. Disse ble satt til å dekke hele delfeltets areal, som ble angitt til å være 0.06925 ha for hovedtaket og 0.01085 ha for mesaninen. En forenkling her er at deler av mesaninen bestod av teknisk areal, mens i modellen er hele taket grønt. Fra mesaninen, til venstre i Figur 2.2, ledes avrenningen direkte til en utløpsnode. Utløpet blir dermed sett på som ikke begrenset. Grunnet at valgt LID-modul er laget for tradisjonelle grønne tak, ledes avrenningen fra hovedtaket via en lagringsenhet kalt «*storage unit*». Videre er restriktorene simulert ved hjelp av en «*outlet link*», som inneholder en avrenningskurve basert på vannhøyden, før vannet når utløpet.

Temperaturfilen ble lagt inn og breddegraden satt til 60 grader. Mens fordampningen settes til å beregnes ut ifra temperatur. Fordampningen i modellen ble beregnet ved hjelp av Hargreaves metode i SWMM på bakgrunn av disse parameterne. Andre parametere, som vind og luftfuktighet, tas dermed ikke hensyn til. Nedbørsfilen legges inn i modellen og kobles til begge delfeltene, med tidsintervall på 0:01. Routing-steg settes til 60 sekunder, mens både vått og tørt avrenningsintervall ble satt til 0:01 altså samme som nedbørsintervallet. Opptaksintervallet settes i senere steg. Oppbyggingen av lagringsenheten, avrenningskurve og LID-modulene går nærmere inn på nedenfor.

I Myhrs masteroppgave om Vega Scene ble ulike modeller testet ut, der en som ble trukket fram og brukt for å simulere avrenning ved fremtidens 20 års regn, ble kalibrert for å treffe på spissavrenningen. Denne er bygd opp ved at både mesaninen og hovedtaket angis som impermeable flater der den grønne delens bidrag til fordampning og treghet i systemet ble tilnærmet med gropmagasiner og overflateruhet, hvor vannet så ble ført til lagringsenheter med restriktorer (Myhr, 2021). Oppbyggingen av modellen i denne oppgaven, skiller seg dermed fra oppbyggingen i Myhr sin oppgave. Blant annet ved at taket er modellert som et vanlig grønt tak, med alt dette innebærer. Med en lagringsenhet og restriktor i tillegg for hovedtaket, med en avrenningskurve som ser annerledes ut med tanke på at overløp er lagt inn.

2.3.1 LID-modul

LID-modulen for grønne tak benyttes på begge delfelt, og blir satt til å dekke hele området. Infiltrasjonen i LID-modulen beregnes ved Green-Ampt. Parameterne i begge felt blir antatt å være like, med unntak av tykkelse og «*width*». Det ble antatt at jordlaget er likt bygd opp fra topp til bunn. Basert på informasjon om Vega Scene og SWMM sin brukermanual ble det estimert verdier for parameterne i LID-modulene, vist i Tabell 2.1.

Tabell 2.1. Initialverdier for LID modulene i SWMM.

Parameter	Verdi	Kilde	Forklaring
LID Usage			LID bruk
Width (m)			Bredde, angis ved lengste vannvei/areal
-Hovedtak	40	a	
-Mesanin	4	a	
LID Controls			LID kontroller
<i>Surface:</i>			<i>Overflate:</i>
Berm Hight (mm)	150	a	Høyde på kant ved overflaten
Vegetation volum fraction	0.1	b	Andel volum vegetasjon
Surface Roughness (Mannings n)	0.1	b	Overflateruhet
Surface slope %	2.5	a	Overflatehelning
<i>Soil:</i>			<i>Jord:</i>
Thickness (mm)			Tykkelse
-Hovedtak	200	a	
-Mesanin	150	a	
Porosity (volume fraction)	0.4	a	Porøsitet
Field capacity (volume fraction)	0.2	b	Feltkapasitet
Wilting point (volume fraction)	0.15	b	Visnepunkt
Conductivity (mm/h)	20	b	Konduktivitet/ledningsevne
Conductivity slope	50	b	Ledningsevnehelning
Suction head (mm)	100	b	Sugehøyde
<i>Drainage Mat:</i>			<i>Dreneringsmateriale:</i>
Thickness (mm)	10	c	Tykkelse
Void fraction	0.5	b	Andel tomrom
Rougness (mannings n)	0.1	b	Ruhet

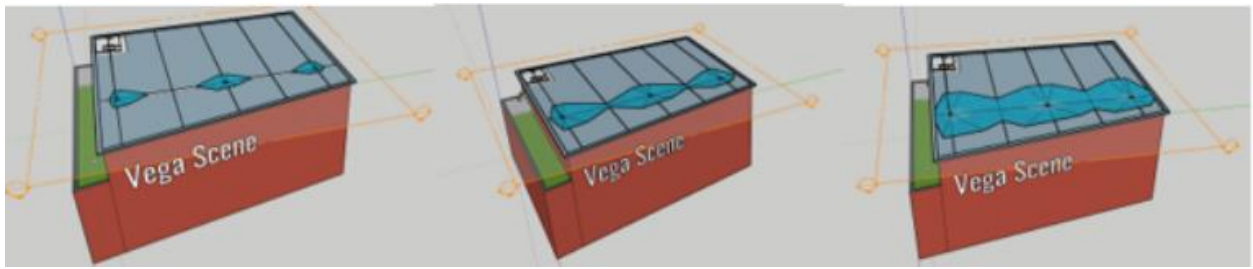
a) Estimat basert på informasjon om Vega Scene

b) (Rossmann, 2015)

c) Estimat for å unngå begrenset vannstrømning gjennom laget.

2.3.2 Oppbygging av lagringsenhet

I en studie fra Braskerud og Paus målte fuktinnholdssensorer at en andel av jordvolumet ikke var mettet når vann rant av taket (Braskerud & Paus, 2022). I virkeligheten er det imidlertid antatt at restriktoren vil holde tilbake vann og dermed fremme metning av taket ved store nedbørhendelser. For å beskrive denne effekten i modellen ble det derfor valgt en lagringsenhet. Lagringsenheten ble plassert nedstrøms LID-modulen for det grønne taket og ble utformet med tanke på å representere en andel av volumet i jorda som ikke har blitt mettet når vann begynner å renne av taket. Overflatearealet i denne lagringsenheten øker med vannhøyden da taket har en helning på 2.5 %, og slukene er plassert i lavpunktet med stigning på begge sider, vist i Figur 2.3. Volumet i denne lagringsenheten må da kun tilsvare det ekstra volumet restriktorene fører til at blir benyttet.



Figur 2.3. Vanndekt areal på hovedtaket ved vannstand 40, 80 og 120 mm. Illustrasjon: (Myhr, 2021).

I SWMM kan arealet av lagringsenheten, som en funksjon av høyden h , beregnes ved

$$Areal = A * h^B + C. \quad (2.1)$$

Det antas at arealet starter ved 0 da slukene er i lavpunktene, dermed settes C til 0. Mens B settes til 1 da det antas en jevn helning, der det gjøres en forenkling hvor de interne helningene mellom slukene blir sett bort fra. Fra sluket skrår taket to veier, hvorav den ene veien er kortere enn den andre. Hvis vannet går i overløp ved 100 mm, vil ikke vannet ha nådd den nærmeste enden.

Maks dybde i lagringsenheten settes til 0.2 m, da det antas at det ikke er behov for mer enn dette. Ved denne høyden når vannet akkurat enden, men påvirkningen er såpass lav at det anses som å spille liten rolle i forhold til avvik.

Ligningen for arealet som funksjon av høyden antas dermed å være:

$$Areal = A * h \quad (2.2)$$

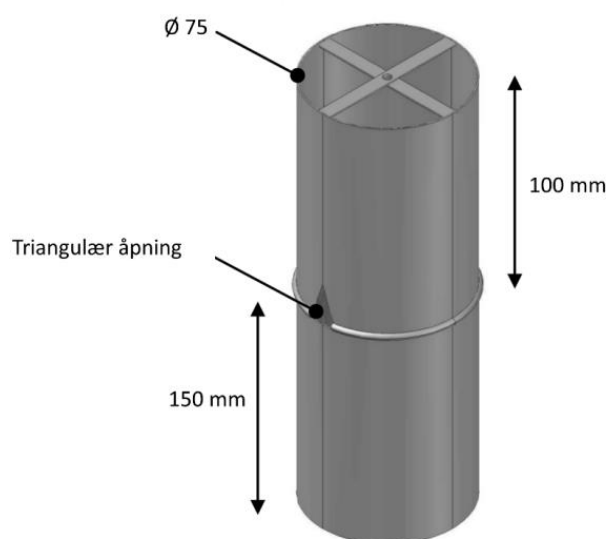
Bredden på taket måler 27 meter, og ved toppen av restriktoren som er ved 0.1 m får vi en lengde på vannet på tvers på 8 m, da taket stiger med 2.5 % i begge retninger. Det totale areal her er dermed 216m^2 . For å ta hensyn til at lagringsenheten kun er ment for å skulle håndtere en ekstra mengde vann, enn det den grønne delen håndterer, må det tas hensyn til hvor stor andel av volumet restriktoren kan benytte for å holde igjen vann. For å ha en initialverdi på A antas det at lagringsenheten er 10 % av det totale volumet, mens resten er jord og mettet allerede mettet når vann renner av det grønne taket. Dermed blir areal til lagringsenheten 21.6m^2 ved toppen av restriktoren, og A regnes ut til å være 216. Denne gjelder uavhengig av høyden da arealet antas å ha en jevn stigning. Usikkerheten knyttet til dette volumet er stor og en kalibrering av denne verdien er dermed være hensiktsmessig. Basert på denne tilnærmingen settes parameteren for lagringsenheten i SWMM til verdiene vist i Tabell 2.2.

Tabell 2.2. Initialverdier i lagringsenheten.

Parameter	Verdi
Storage curve	FUNCTIONAL
Coefficient (A)	300
Exponent (B)	1
Constant (C)	0

2.3.3 Avrenningskurve i restriktor:

Hovedtaket ble bygd med 3 sluk med restriktorer der vannføringen avhenger av vannhøyden. Det lages dermed en avrenningskurve som gjelder for hele taket samlet, altså for alle 3 restriktorene. Utformingen til en restriktor illustreres i Figur 2.4.



Figur 2.4. Strupeanordningen for hovedtaket. Illustrasjon fra: (Paus, 2016).

For å angi hvordan avrenningen foregår gjennom alle slukene på hovedtaket, som en funksjon av vannhøyden, benyttes formler angitt i Tabell 2.3. Som gjelder for henholdsvis dykket og fritt utløp for den trikulære lysåpningen, samt ved overløp.

Tabell 2.3: Oversikt over formler benyttet for utregning av avrenningskurve.

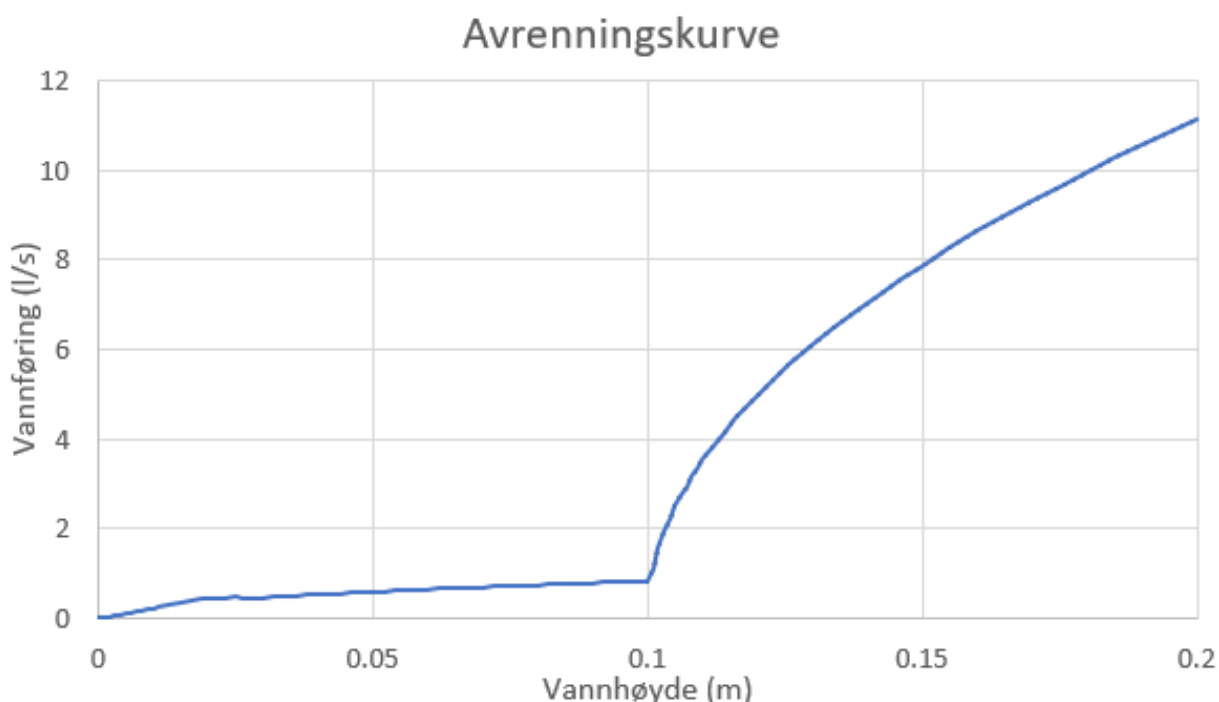
Formel	Beskrivelse
$Q_{fritt} = C_f * 4 * \sqrt{\frac{2}{3} * g * \left(\frac{1}{3} * H * h^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{5} * h^{\frac{5}{2}} \right) * n}$	2.3 Likning benyttet for høyde 0-25mm.
$Q_{dykket} = C_d * \frac{1}{\sqrt{3}} * H^2 * \sqrt{2 * g * h} * n$	2.4 Likning benyttet for høyde 25-100mm.
$Q_{overløp} = C_o * A * \sqrt{2 * g * (h - 0.1)} * n$	2.5 Likning benyttet for høyde 100-200mm

Hvor formel 2.3 og 2.4 er utledet for løsningen til restriktorene gjennom forsøk (Paus, 2016). Ved overløp er kun formel 2.5 benyttet, og den triangulære åpningens bidrag er dermed neglisjert ved overløp. Verdien på parametere benyttet for formlene i Tabell 2.3, vises i Tabell 2.4.

Tabell 2.4. Forklaring av parametere brukt i Tabell 2.3.

Parameter	Verdi	Enhet	Beskrivelse
C_f	0.77	-	Kontraksjonskoeffisient fritt utløp(Paus, 2016)
C_d	0.55	-	Kontraksjonskoeffisient dykket utløp(Paus, 2016)
C_o	0.6	-	Kontraksjonskoeffisient overløp(Statens vegvesen, 2022)
H	0.025	m	Lysåpnings høyde
h	-	m	Høyde vannstand, parameter som varieres
g	9.81	m/s ²	gravitasjon
n	3	-	Antall sluk
A	0.0442	m ²	Areal overløp

Basert på Tabell 2.3 og Tabell 2.4 får vi en avrenningskurve, vist i Figur 2.5. Verdiene for avrenning mot høyde legges inn som en «rating curve» i SWMM, som blir angitt til å gjelde i «outlet link».



Figur 2.5. Avrenningskurve for hovedtaket.

2.4 Sensitivitetsanalyse

For å få et bilde på hvilke og hvordan variablene i SWMM-modellen påvirker avrenningen gjennomføres en sensitivitetsanalyse. For å få kunnskap som blir viktig for å plukke ut de

variablene som har mest å si til kalibrering, slik at kalibreringsprosessen forenkles, samt faren for overtilpassning reduseres. For å gjennomføre sensitivitetsanalysen benyttes programmeringsverktøyet R versjon 4.2.2 (R Core Team, 2022), koden for sensitivitetsanalysen vises i Vedlegg A. Utviklingen av koden ble gjennomført i samarbeid med masteroppgaven til Frank Andersen (2023) «Kalibrering av overvannsmoell ved bruk av maskinlæring. SWMM-moell for Sandsli i Bergen». Kode brukt for å undersøke hvordan endringer av parameterverdier påvirker både total avrenning i perioden 01.04.2020 – 01.12.2020, samt maksimumsavrenning i denne perioden som forekommer 26.10.2020. Periodene ble angitt i SWMM-moellen, mens opptaksintervallet settes til 0:01. For å sikre mest mulig nøyaktig data for maksimumsavrenningen.

For å samhandle med SWMM i R koden brukes pakken *swmmr* (Leutnant et al., 2019). SWMM-moellen leses inn med angitte standardverdier. I koden angis hvilken parameter som sensitiviteten ønskes undersøkt for, og en og en parameter ble undersøkt med tilhørende maksimums- og minimums verdi. Parameterne som ble undersøkt i sensitivitetsanalyse, med tilhørende verdier, er angitt i Tabell 2.5.

Tabell 2.5. *Parametere brukt i sensitivitetsanalyse med minimums-, maksimums- og initialverdi.*

Parameter	Minimums verdi	Initialverdiverdi	Maksimums verdi
LID Usage			
Width			
-Hovedtak	30	40	50
-Mesanin	2	4	7
LID Control			
<i>Surface</i>			
Berm Hight (mm)	50	150	250
<i>Soil</i>			
Thickness			
-Hovedtak	170	200	230
-Mesanin	130	150	170
Porosity	0.3	0.40	0.55
Field capacity	0.18	0.2	0.25
Wilting point	0.05	0.15	0.17
Conductivity	10	20	500
Conductivity slope	40	50	60
Suction head	50	100	150
<i>Drainage Mat.</i>			
Roughness	0.02	0.1	0.2
Lagringsenhet			
Storage coefficient	200	300	400

For de parameterne som ble antatt like for hovedtaket og mesaninen, ble kun verdien for hovedtaket gjennomgått i sensitivitetsanalysen. Resultatene fra SWMM leses ved hjelp av

pakken zoo (Grothendieck, 2005). Resultatene fra sensitivitetsanalysen skrives så ut i en Excel-fil, hvor pakken readxl (Wickham & Bryan, 2023) brukes for å lese Excel filer og pakken openxlsx (Schauberger & Walker, 2022) for å skrive i Excel filer.

2.5 Kalibrering og validering

Grunnet vanskeligheter med å lage en modell som fungerer ved snø og snøsmelting, ble ikke periodene hvor dette er tilfellet tatt med til kalibrering og validering. Modellens bruksområde begrenses da til å gjelde avrenning grunnet nedbør, altså utelates perioder påvirket av snø og snøsmelting. For å velge ut hvilke tidsperioder som skulle brukes til kalibrering og validering, ble det sett på data for både temperaturer og snødybde fra Blindern målestasjon. På bakgrunn av dette, ble periodene 01.04.2020 – 01.12.2020 og 01.04.2021 – 01.12.2021 ansett som ikke påvirket av snø eller snøsmelting. Førstnevnte periode ble valgt til kalibrering, mens sistnevnte ble valgt til validering.

For å gjennomføre kalibrering og validering av modellen lages en kode i R, versjon 4.2.2. Lagt ved i vedlegg B. Utviklingen av koden ble gjennomført i samarbeid med masteroppgaven til Frank Andersen (2023) «Kalibrering av overvannsmodell ved bruk av maskinlæring. SWMM-modell for Sandsli i Bergen». I koden ble det angitt hvilken periode som ble brukt til kalibrering og hvilken til validering. For å få samme tidsintervall på simulert avrenning og observert avrenning ble opptaksintervallet satt til 0:10 i SWMM-modellen, mens avrenningsdataen i SWMM ble satt til å ha 3 desimaler. Excel-filen med observert avrenningsdata leses inn i koden med pakken readxl, mens pakken swmmr brukes til å samhandle med modellen i SWMM.

Parametere som ønskes kalibrert samt deres plassering i filen til SWMM-modellen angis i koden, sammen med maksimums- og minimumsverdi definert i Tabell 2.5. For de parameterne som ble tatt med som var antatt like for mesaninen og hovedtaket, ble disse satt til å måtte være like gjennom kalibreringsprosessen. Initialverdi beholdes for parametere som ikke blir tatt med til kalibrering. Ved hjelp av pakken Deoptim (Mullen et al., 2011), altså global optimalisering via differensiell evolusjon, kalibreres modellen for å få en best mulig KGE (Kling-Gupta-efficiency). Som vil si nærmest mulig opp mot 1. Deoptim brukes til å optimalisere parameterne for å minimere målfunksjonen, ved å justere verdiene basert på tidligere løsninger for å oppnå en bedre tilpasning. Antall individer i populasjonen blir satt til 160 og antall generasjoner til 2. Der antall individ representerer en potensiell løsning, mens de beste individene blir brukt som utgangspunkt til å kjøre en ny generasjon. Da koden fungerer ved at DEoptim søker å finne minimumsverdi, rapporteres den negative verdien til KGE i koden slik at løsningen består av de parameterverdiene som gir en KGE som er nærmest mulig 1.

Grunnen til at KGE brukes er at den kan brukes som en indikator til å angi hvor godt en modells simuleringer stemmer med observasjonene (Knoben et al., 2019). Verdien kan variere fra $-\infty$ til 1, der 1 betyr perfekt gjengivelse. Formelen for KGE er følgende:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2.6)$$

Der r er angir korrelasjonskoeffisienten, α angir variabilitet og β er Bias. Formelen kan dermed angis slik:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (2.7)$$

Der σ_{sim} er standardavviket i simuleringene og σ_{obs} er standardavviket i observasjonene, mens μ_{sim} er gjennomsnittlig simulert avrenning og μ_{obs} er gjennomsnittlig observert avrenning (Knoben et al., 2019).

Ved å kjøre koden opprettes en midlertidig SWMM-modell, som kjører om og om igjen med endrete parameterverdier, som blir satt basert på pakken Deoptim. Pakken zoo benyttes for å lese SWMM resultatene. Til slutt lages en ny fil med en kalibrert SWMM-modell, som inneholder de oppdaterte verdiene. Verdier for KGE og Bias, altså volumavviket mellom simulert og observert avrenning, for både kalibreringsperioden og valideringsperioden beregnes i tillegg.

2.6 QVF og grenser for påslipp

For å sammenligne IVF statistikken fra Blindern med avrenningen fra Vega Scene, lages en QVF (avrenning-varighet-frekvens) statistikk for Vega Scene. Mens IVF statistikk angir hvor ofte vi kan forvente at en nedbørintensitet med bestemt varighet overskrides, angir QVF statistikk hvor ofte vi kan forvente at en bestemt avrenningsintensitet med en bestemt varighet overskrides. For å lage QVF statistikken for Vega Scene benyttes historisk nedbørs- og temperaturmålinger fra Blindern i den kalibrerte SWMM-modellen for å simulere avrenning. Tidsintervallet som benyttes er 2002-2022, mens opptaksintervallet settes til 0:01 i SWMM-modellen.

QVF statistikk lages så ved å finne de største avrenningshendelsene for blokker på et og et år for intervallene 1, 5, 10, 30, 60, 180, 720 og 1440 min. For å få avrenningsdataen for varighetene

benyttes en kode i R, versjon 4.2.2, lagt ved i vedlegg C. Koden er bygget opp ved at kalibrert SWMM-modell med historisk nedbør og temperatur leses inn, og en midlertidig modell lages. Koden kjøres for et og et år, hvor alle de nevnte intervallene blir undersøkt hver for seg. Største avrenningsintensitet for hver varighet ved alle årene, blir skrevet ut i en Excelfil. Følgende pakker ble benyttet i koden: `swmmr`, `zoo`, `readxl`, `openxlsx`, `tibble` (Müller & Wickham, 2023), `stringi` (Gagolewski, 2022) og `dplyr` (Wickham et al., 2023). Videre benyttes plottetposisjonsformelen til Weibull for å lage QVF statistikk basert på avrenningsintensitetene i Excelfilen fra kjøringen av koden i R, for årene 2002-2022.

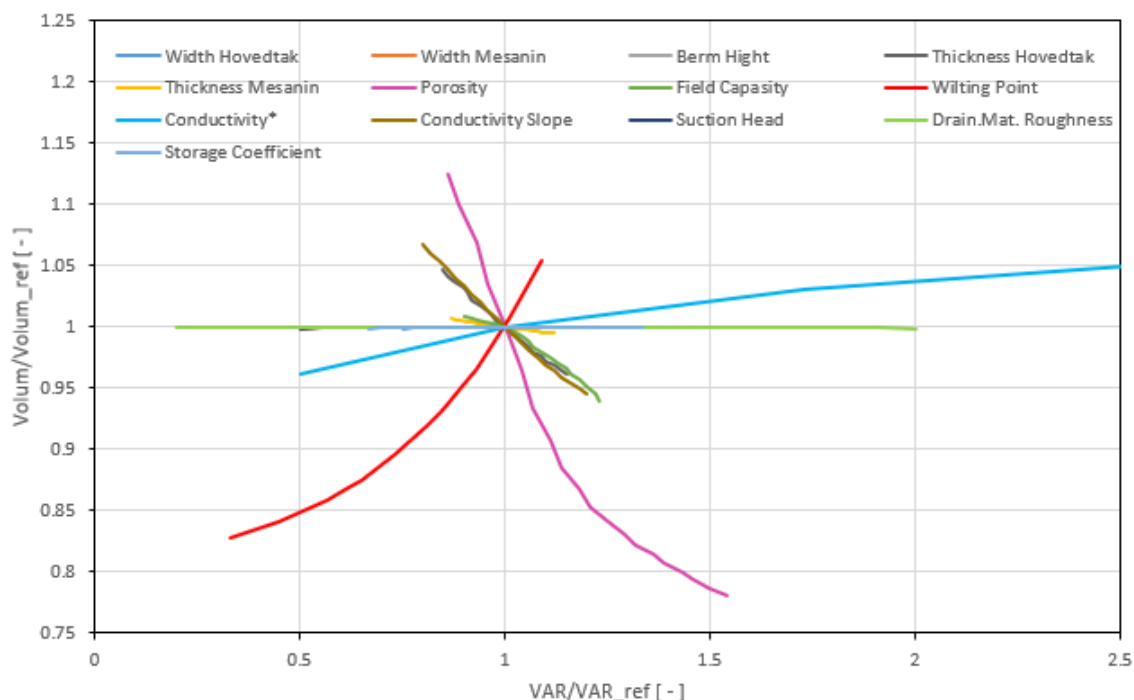
For sammenligningen med generelle grenser for påslipp til offentlige overvanns- og fellesledninger, innhentes informasjon gitt fra Oslo kommune angående verdier for påslipp, som ligger i hver sin ende av skalaen med tanke på mengde per areal. Ved 5-års gjentaksintervall med klimafaktor, skal løsninger som fordøyer og forsinker nedbørsmengdene være ivaretatt. Og det er mulig at noe påslipp til offentlig nett innvilges. For en aktiv overvanns (OV) ledning er maksimal tillat påslipp på 35 l/s per ha for tiltaksareal opp til 0.5 ha (Oslo kommune, 2022). Mens maksimal tillat påslipp til avløp fellesledning eller inaktiv OV-ledning for tiltaksareal fra 1 ha og oppover er opp mot 10 l/s (Oslo kommune, 2017). Påslipp avhenger av flere faktorer, blant annet tiltaksareal, og det er dermed ikke ensbetydende med at påslipp innvilges. De to verdiene ligger i hver sin ende av skalaen med tanke på hva som er som tillates med tanke på l/s per ha.

3 Resultater og diskusjon

3.1 Sensitivitetsanalyse

Resultatet fra sensitivitetsanalysen for avrenningsvolum i perioden 01.04.2020 til 01.12.2020 vises i Figur 3.1. Resultatene tolkes ved å undersøke hvilke parametere som varierer mest på y-aksen, jo mer endring her jo større forskjell i avrenning ved endret parameterverdi.

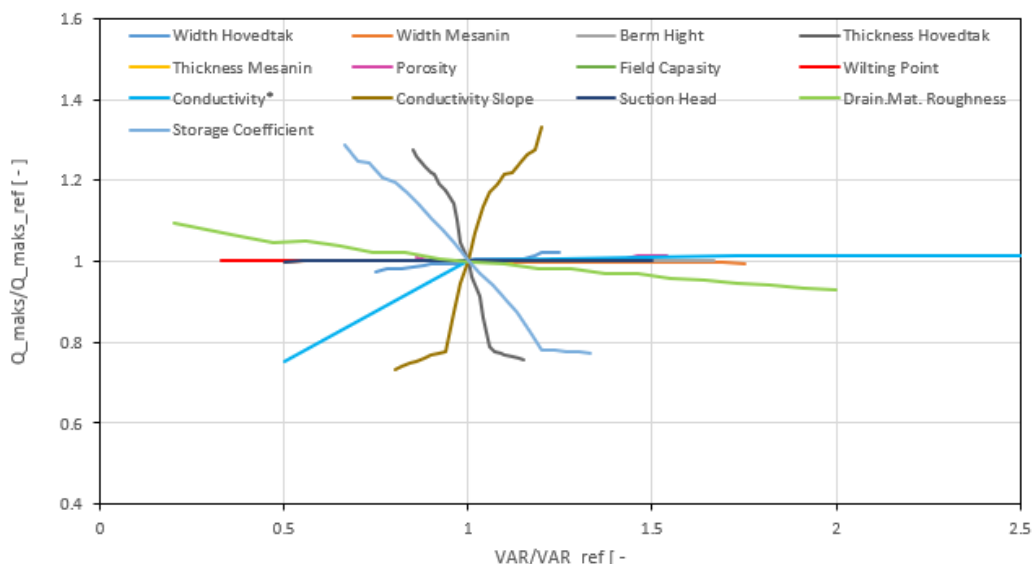
Sensitivitetsanalyse for avrenningsvolum



Figur 3.1. Sensitivitetsanalyse volumavrenning 01.04.20-01.12.2020. Ny volumavrenning ved endret parameterverdi delt på volumavrenning ved initialverdi for parametere på y-aksen. Mot ny parameterverdi delt på opprinnelig parameterverdi på x-aksen. Parameteren «Conductivity» var satt med et stort intervall, og fortsetter et stykke videre utenfor figuren med lavere og lavere stigning.

Figur 3.2 inneholder sensitivitetsanalyse for spissavrenning, ved største avrenningshendelse i perioden som var 26.10.2020.

Sensitivitetsanalyse for spissavrenning



Figur 3.2. Sensitivitetsanalyse spissavrenning 26.10.20. Ny spissavrenning ved endret parameterverdi delt på spissavrenning ved initialverdi for parametere på y-aksen. Mot ny parameterverdi delt på opprinnelig parameterverdi på x-aksen. Parameteren «Conductivity» var satt med et stort intervall og fortsetter videre ut av figuren, men har stabilisert seg og fortsetter helt flatt.

Det er tydelig at noen parametere er mer sensitive enn andre i denne analysen, og som det dermed kan lønne seg å fokusere på i kalibreringen. Men det er enkelte hensyn det er viktig å ha

med seg når disse resultatene tolkes. En er at spissavrenning foregikk etter en lengere periode med regn, slik at det var relativt våte initialbetingelser. Dette kan påvirke hvilke parametere som regnes som sensitive og ikke. Blant annet kan man se at porøsitet ikke er sensitiv, mens dette er noe man kan regne med ville vært ganske forskjellig hvis spissavrenningen hadde foregått ved en hendelse med tørre initialbetingelser. Og i en studie av Jeffers et al. med LID modulen grønt tak, ble porøsiteten funnet til å være den mest sensitive for spissavrenningen. I tillegg til at andel tomrom (*void fraction*) i dreneringslaget ble funnet til å være noe sensitiv (Jeffers et al., 2022). Mens denne ikke ble undersøkt i denne oppgaven. Men totalt sett var det i stor grad de samme parametere sensitive i Figur 3.1 og Figur 3.2, som i studien av Jeffers et al., når man ser på spissavrenning og volumavrenning. Men i varierende grad hvor mye. Det er dermed rimelig å anta at hvilke parametere som slår ut i en sensitivitetsanalyse, avhenger av type avrenning man ser på. Slik at om det hadde vært en hendelse med tørre initialbetingelser for spissavrenning, ville resultatet sett annerledes ut her. En sensitivitetsanalyse for volumavrenning vil derfor kunne trekke fram endel parametere som ikke kommer fram ved spissavrenningen da denne tar med seg mange flere hendelser. Ved å se på begge sensitivitetsanalysene, så utfyller de hverandre på en del områder.

Noe annet som kan tenkes å påvirke hvor sensitive parametere er i analysen, er hvordan initialverdiene er satt. Hvis for eksempel porøsiteten blir satt veldig høy, slik at det mer vann holdes på ved nedbørshendelser, vil parametere knyttet til avrenning ved tørre initialbetingelser slå mindre ut i sensitivitetsanalysen. Initialverdiene på parametere kan dermed være med å påvirke resultatene i sensitivitetsanalysen, slik at det derfor er viktig med greie initialverdier. Det at både total volumavrenning og spissavrenning blir tatt med gjør at flere faktorer blir tatt hensyn til, slik at sensitivitetsanalysen kan anses som nyttig for å velge ut parametere til kalibrering. Basert på sensitivitetsanalysen tas parametere i Tabell 3.1 med videre til kalibrering.

Tabell 3.1. Verdier tatt med til kalibrering på bakgrunn av sensitivitetsanalyse

Parameter	Begrunnelse
Thickness	
-Hovedtak	Sensitiv for både volum- og spissavrenning
Porosity	Sensitiv for volumavrenning
Field capacity	Sensitiv for volumavrenning
Wilting point	Sensitiv for volumavrenning
Conductivity	Sensitiv for både volum- og spissavrenning.
Conductivity slope	Sensitiv for både volum- og spissavrenning
Roughness	Sensitiv for spissavrenning
Storage coefficient	Sensitiv for spissavrenning

Dette på bakgrunn av hvilke parametere som hadde mest og si for volumavrenning og/eller spissavrenningen i sensitivitetsanalysen. Av parametere som ikke ble tatt med, men som var noe sensitive, kan tykkelsen på mesaninen for volumavrenning og hovedtakets «*Width*» for spissavrenningen nevnes. De tas ikke med da de ikke var særlig sensitive, og at andre parametere

som ble tatt med kan tenkes bidra til å rette opp eventuelle bidrag de ville hatt i kalibreringen. For «*Width*», som blant annet omhandler hvor langt vannet renner, vil det at ruheten i dreneringslaget er med til kalibrering gjøre at avrenningens hastighet vil bli tatt hensyn til i en viss grad. Det samme gjelder «*Void fraction*», altså andel tomrom, som ble anset som noe sensitiv i studien til Jeffers et al. Denne tilnærmingen kunne blitt gjort for å argumentere for å fjerne flere parametere som ble tatt med til kalibrering, men det ble antatt at det mest hensiktsmessige var å ta med alle som var relativt sensitive i sensitivitetsanalysen

3.2 Kalibrering og validering

Koden brukt for kalibreringen inneholdt 8 parametere, 160 individer i populasjonen og 2 generasjoner, og brukte 33 minutter på kjøringen. Resultatene fra kalibreringen med de nye parameterverdiene vises i Tabell 3.2. De fleste verdiene ligger i nærheten av initialverdien, mens noen har blitt endret mer. Dette gjelder blant annet porøsiteten som ligger noe lavere og dermed gir avrenning noe tidligere, mens konduktiviteten som hadde et ganske stort intervall, ligger høyere.

Tabell 3.2. Kalibrerte parameterverdier

Parameter	Initialverdi	Ny kalibrert verdi
Thickness		
-Hovedtak	200	192
Porosity	0.4	0.325
Field capacity	0.2	0.202
Wilting point	0.15	0.138
Conductivity	20	78
Conductivity slope	50	55.8
Roughness	0.1	0.081
Storage coefficient	300	377

Ved de nye kalibrerte verdiene får kalibreringsperioden en noe høyere KGE enn valideringsperioden, vist i Tabell 3.3. Mens bias ligger begge rett under 1 for både kalibrerings- og valideringsperioden. Kalibreringsperioden var fra 01.04.2020 til 01.12.2020, mens valideringsperioden var fra 01.04.2021 til 01.12.2021.

Tabell 3.3. KGE og BIAS for kalibrering og validering.

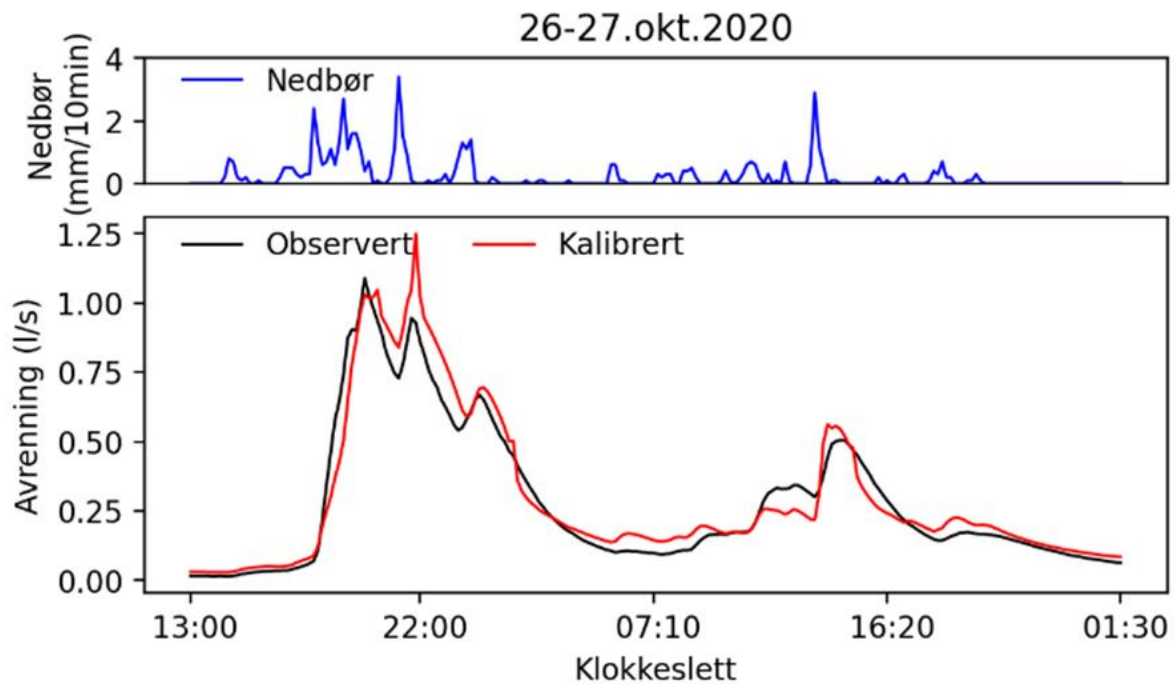
	KGE	BIAS
Kalibrering	0.91	0.97
Validering	0.86	0.96

Resultatene tyder på at kalibreringen har klart å simulere avrenningen rimelig godt. I tillegg har ikke valideringsperioden en betydelig dårligere KGE. Dette kan tyde på at modellen ikke har for stor grad av overtilpassning, og at modellen treffer også rimelig godt på avrenning den ikke er trent på. En KGE på 1 anses som perfekt samsvar, mens det i har blitt vist til at en KGE på -0.41 angir en modell som simulerer gjennomsnittlig observert avrenning gjennom hele perioden. Og høyere verdi enn -0.41 vil si at modellen angir simulert avrenningen bedre enn denne tilnærmingen (Knoben et al., 2019). En KGE på 0.86 for valideringsperioden kan i den sammenheng anses som et bra resultat. En bias i valideringsperioden på 0.96 vil si at totalt simulert avrenning stemmer godt overens med totalt observert avrenning. Dette, sammen med en høy KGE, tyder på at modellen forutsier langtidsavrenningen godt og at modellen fungerer både for spissavrenningen og volumavrenning. Men dette betyr ikke nødvendigvis at de faktiske parameterverdiene er lik kalibrert parameterverdi. Det har blant annet blitt observert at endring av ulike parametere kan føre til lignende endringer i simulert avrenning, noe som underbygger dette. Det kan dermed heller tolkes som at dette er en kombinasjon av parameterverdier som beskriver avrenningen på en god måte, men at dette ikke nødvendigvis er de reelle parameterverdiene.

Da både kalibrerings- og valideringsperioden var på 8 sammenhengende måneder med varierende type nedbør og avrenning, kan det fortsatt være variasjon når det kommer til hvor god modellen er ved ulike typer nedbør og avrenning. Resultatene ved følgende type hendelser presenteres derfor nærmere: Spissavrenning med fokus på restriktorens påvirkning, lavere topper, for høy simulert avrenning og kort mot lang nedbør. For å diskutere hendelsene vises avrenningshendelser som illustrerer hva som ønskes undersøkt, med hovedfokus på valideringsperioden da dette er avrenningshendelser modellen ikke er trent på. Med unntak av den største observerte avrenningshendelse i hele perioden, som foregikk i kalibreringsperioden. Periodene som vises er dermed ikke tilfeldig valgt, og simulert og observert avrenning fra hele kalibrerings- og valideringsperioden er lagt ved i vedlegg D.

3.2.1 Spissavrenning, med fokus på restriktorens påvirkning

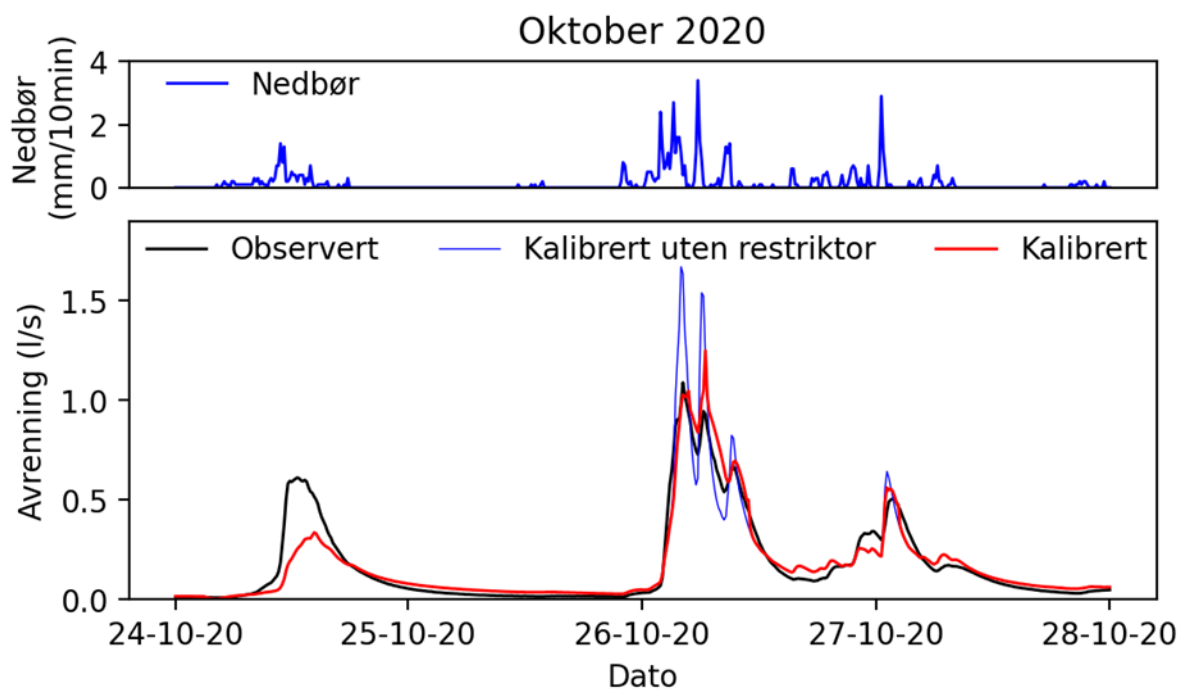
Figur 3.3 viser den største observerte avrenningshendelsen i hele perioden, denne foregikk i kalibreringsperiode. Hendelsen foregikk på høsten i en periode med langvarig regn, og simulert avrenning treffer godt sammenlignet med observert avrenning.



Figur 3.3. Spissavrenning i kalibreringsperioden, høyeste for både kalibrerings og valideringsperioden.

I den simulerte avrenningen går noe vann i overløp ved denne hendelsen. Dette er den eneste simulerte hendelsen der dette skjer. Avrenningskurven baserer seg på formler fra forsøk for restriktor, med utforming som Vega Scene, og det er dermed rimelig å anta at denne ikke avviker i for stor grad. Basert på avrenningskurven, observert avrenningsmengde ved denne hendelsen og KGE for perioden, tyder dette på at dette var en hendelse hvor vannhøyde var i nærheten av overløpet. Ved nedbørshendelser som fører til større avrenning vil dermed vannet gå i overløpet.

I Figur 3.4 kan vi se hvordan simulert avrenning hadde vært uten lagringsenheten og restriktoren i den kalibrerte SWMM-modellen. Ved den største kalibreringshendelsen treffer simulert avrenning dårligere uten restriktoren i modellen, og de største lokale topper blir større, mens påfølgende lokalt lavpunkt blir mindre. Det ser dermed ut som restriktoren jevner ut avrenningen noe her. Denne utjevningen observeres å være større ved nedbør der nedbørintensiteten varierer i større grad, enn ved jevn nedbør. Det ses også at simulert avrenning må være av en viss størrelse for at det observeres en forskjell. Grovt sett er det ikke noe betydelig forskjell ved avrenningshendelser under 0.5 l/s i simulert avrenning med og uten restriktor i SWMM-modellen. Dette har nok sin forklaring i at det ikke trengs noe særlig høy vannhøyde for å komme opp i denne avrenningsmengden, samt at da taket skråer inn mot sluket er volumet som benyttes lite. Ved denne hendelsen ble simulert avrenning bedre med lagringsenheten og restriktoren, noe som i hovedsak gjaldt de fleste stedene det var en forskjell.

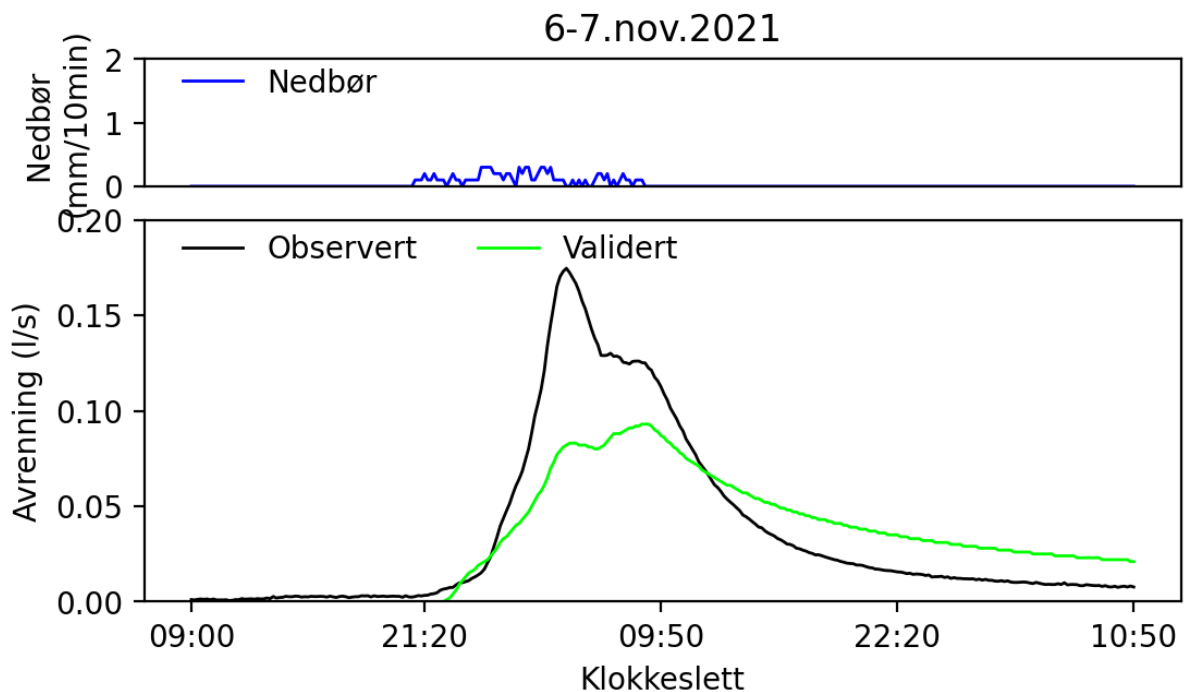


Figur 3.4. Avrenning i kalibreringsperioden, spissavrenning for hele perioden. Med simulert avrenning fra kalibrert modell hvor restriktorene ble fjernet fra SWMM-modellen.

Dette kan tyde på at restriktorene har noe å si for disse tilfellene, men at dette gjelder de største avrenningshendelsene i økende grad, men i noe begrenset omfang. Det at overløpet ble nådd i modellen, kan tyde på at ved større avrenningshendelser enn observert vil restriktoren ha mindre å si for simulert avrenning, da vannet renner i overløp.

3.2.2 Lavere avrenningstopper

Nedbørshendelser som førte til tydelig avrenningstopper, men av en ikke så stor størrelse kan se ut til å bli noe underestimert. Der et eksempel vises i Figur 3.5. Hendelsen skjedde etter en tørrværsperiode, og simulert avrenningstopp ligger noe lavere enn observert. Ved denne type avrenning kan det se ut til at simulert avrenning konsekvent viser noe for lavt, i tillegg til at simulert avrenning fortsetter noe lenger enn observert avrenning.

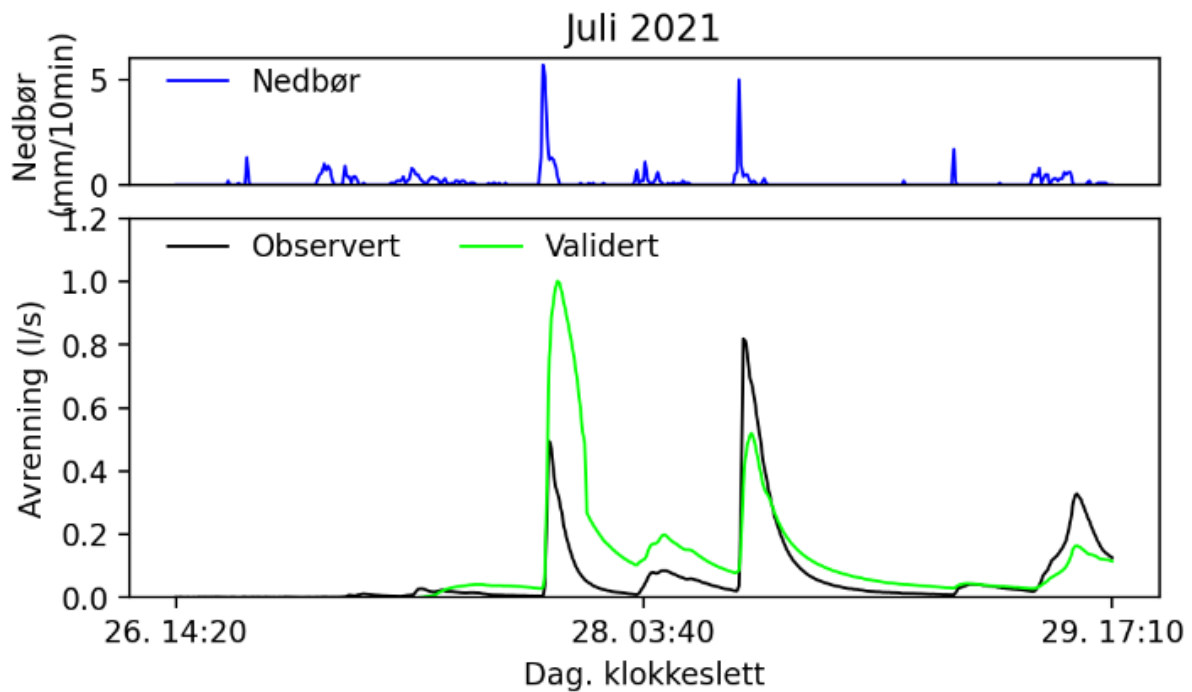


Figur 3.5. Eksempel på lavere avrenningstopp i valideringsperioden.

Det kan være ulike årsaker til at modellen ser ut til å konsekvent ha noe avvik på denne type avrenning. Restriktorene i modellen ser ikke ut til å være grunnen, da avrenningshendelsene er såpass små at restriktorene i modellen ikke senker disse toppene. En mulig årsak kan være at hovedtaket hadde variasjon i jorddybde, og at deler av taket dermed starter å bidra til avrenning tidligere enn andre. Da SWMM-modellen har lik jordtykkelse blir denne høyere enn de laveste områdene på hovedtaket, noe som kan gå ut over de mindre avrenningshendelsene ved at disse områdene i simulert avrenning begynner å bidra senere og i mindre grad ved små hendelser enn de faktisk gjør. En mulig annen årsak kan være at å treffe godt på de større toppene er viktigere for å oppnå en god KGE i kalibreringen, og at et større prosentvist avvik skjer ved de mindre hendelsene for å få en best mulig KGE totalt sett. Slik at kalibreringen har ført til parameterverdier som er tilpasset de større avrenningshendelsene i større grad.

3.2.3 Høy simulert avrenning

I Figur 3.6 vises en avrenningshendelse i valideringsperioden der avviket mellom simulert og observert kalibrering avviker i størrelsen på toppen. Hendelsen forekom om sommeren med regn i forkant, og simulert avrenning ligger høyere enn observert.



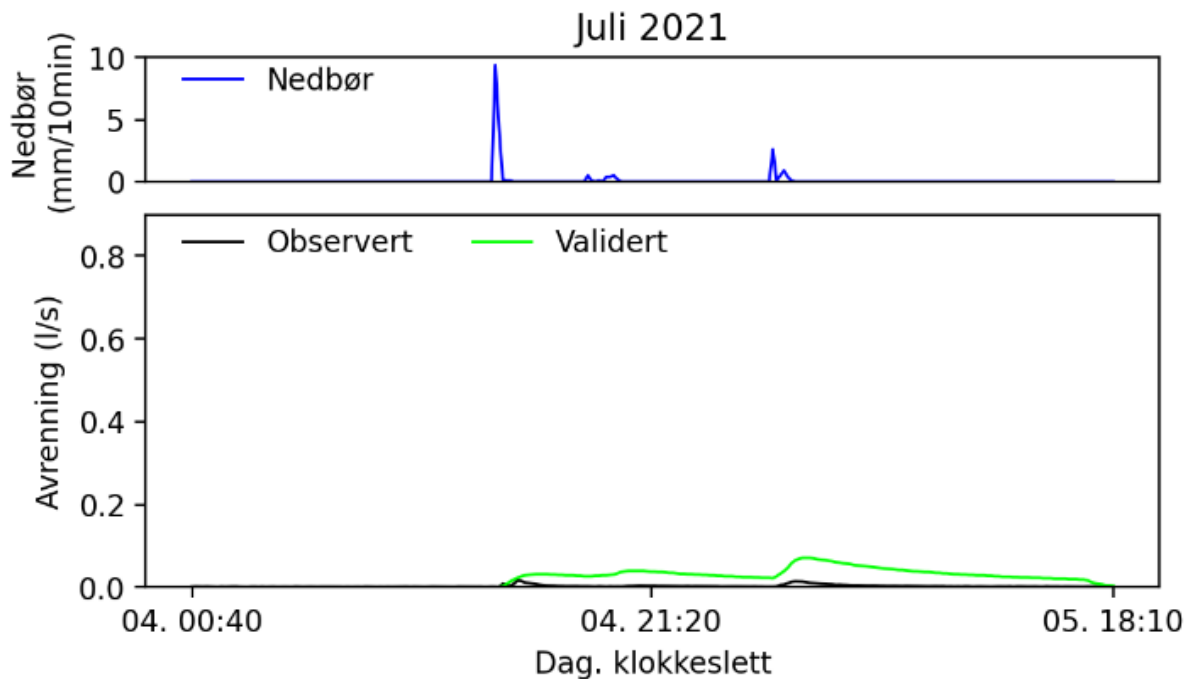
Figur 3.6. Avrenning i valideringsperioden, med regn i forkant.

Det er få hendelser hvor simulert avrenning er større enn observert, men et fellestrekk ved flere av disse tilfellene er at det har regnet kort tid i forkant. Dette kan peke på at initialbetingelsene kan være feil simulert. En forklaring på dette kan være at beregning av fordampning ikke treffer helt, og at i simuleringen holdes vannet noe lenger som gir våtere initialbetingelser enn i virkeligheten. Det er også observert at avrenningen avtar noe saktere for simulert avrenning, noe som kan være med å bidra til at når et nytt regnskyll kommer, blir avrenningstoppen større i simuleringen. Fordampningen var ikke en parameter som ble kalibrert, og den ble beregnet ved Hargreaves på bakgrunn av filen med maksimums- og minimumstemperaturen per dag, samt breddegrad angitt i SWMM-modellen. Fordampning i SWMM-modeller ved kalibrering av grønne tak, har blitt vist å være viktig får å treffe bra ved kalibrering (Limos et al., 2018). Da temperaturen kun ble angitt med ytterpunktene per dag, samt at det er flere faktorer som påvirker fordampning enn kun temperatur, er det forbedringspotensial her. Og det kan tenkes at modellen hadde blitt bedre hvis den hadde tatt hensyn til blant annet vind, luftfuktighet og solstråling. Dermed er dette et område som kan forbedres når det kommer til å lage en modell som treffer best mulig på initialbetingelser, og det finnes ulike løsninger for å beregne fordampning i SWMM-modellen hvis man ønsker å benytte flere parametere.

En annen mulig forklaring er at dette er korte og intense nedbørshendelser om sommeren. Ved denne type nedbør kan det være større lokale forskjeller enn ved jevne nedbørshendelser. Benyttet nedbørmåler for simuleringen lå 550 m unna taket, slik at lokale forskjeller i nedbør kan være en forklaring på avviket.

3.2.4 Kort mot lang nedbør

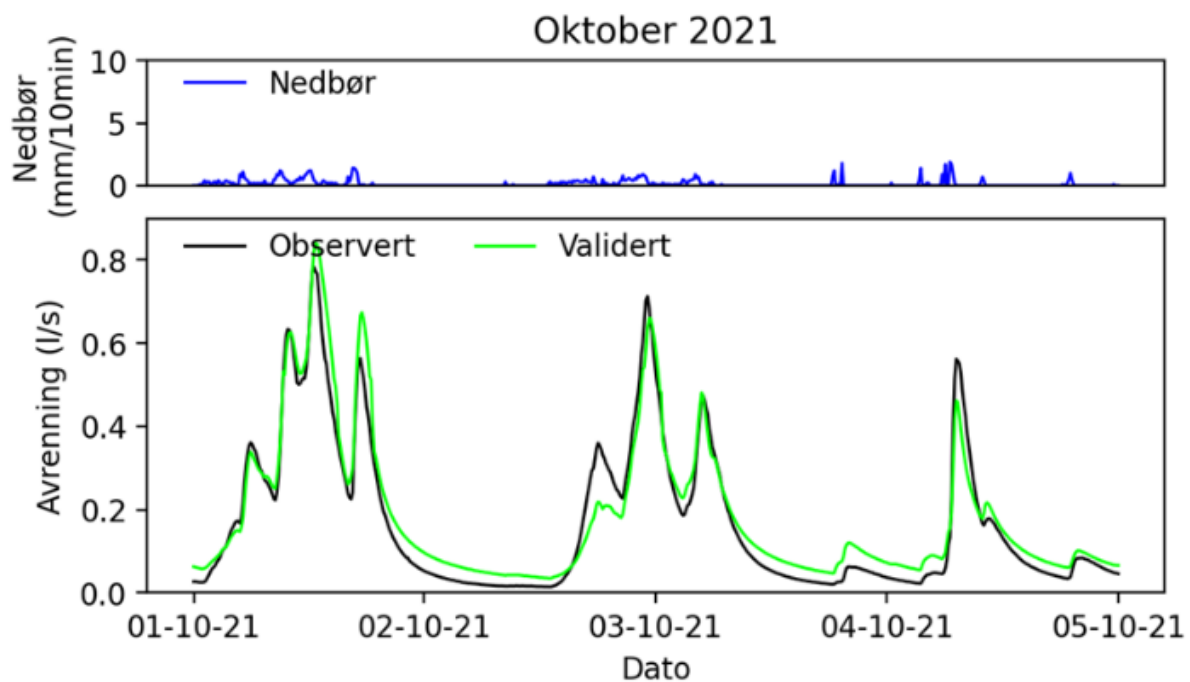
Det observeres store forskjeller i hvor stor avrenningen er i forhold til nedbøren, på bakgrunn av nedbørens lengde, samt initialbetingelser. I Figur 3.7 vises en kort, men veldig intens nedbørshendelse. Dette var den mest intense nedbørshendelsen i perioden, med omtrent 14 mm nedbør på rundt 20 min. Hendelsen hadde tørre initialbetingelser, og avrenningen fra taket er minimal. Simulert avrenning viser også lav avrenning, men ligger noe over observert.



Figur 3.7. Kort og intens nedbørshendelse i valideringsperioden.

Selv om det er noe avvik på simulert og observert avrenning, kan simuleringen sies treffe ganske bra da det er snakk om en såpass stor hendelse. Enn mulig grunn til avviket, kan også være at brukt målestasjon ligger 550 m unna Vega Scene, noe som kan utgjøre en forskjell ved såpass kort og intens nedbør.

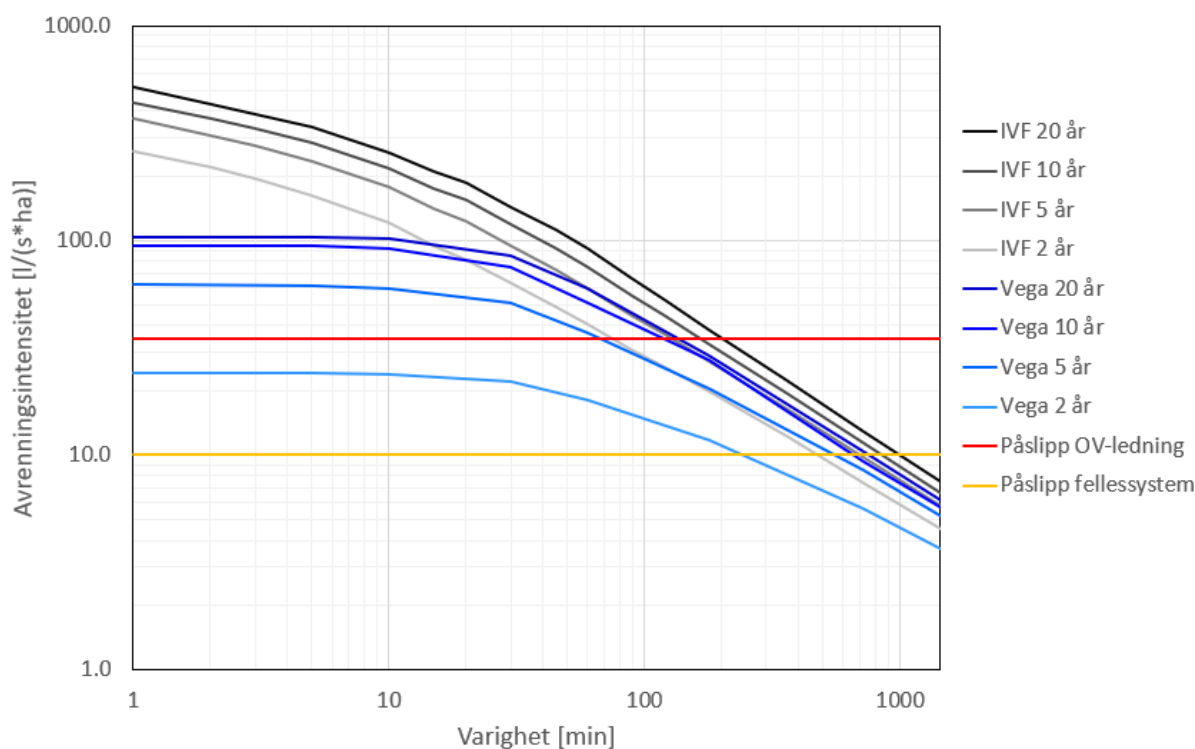
Figur 3.8 viser en langvarig nedbørshendelse med en betydelig lavere intensitet enn i Figur 3.7, men som førte til en av de større avrenningshendelsene i perioden. Initialbetingelsene var her våte, og simulert avrenning treffer observert avrenning godt. Det kan synes at ved lengre nedbørshendelser så stabiliserer simulert avrenning seg godt i nærheten av observert avrenning. Å treffe godt på store avrenningshendelser bidrar i stor grad til å få en god KGE, og det kan se ut som at modellen har blitt kalibrert slik at den treffer godt på hendelser med langvarig nedbør.



Figur 3.8. Langvarig nedbørshendelse i valideringsperioden.

3.3 Simulert QVF, IVF og påslippsmengder

Figur 3.9 viser en sammenligning mellom IVF statistikk hentet fra Blindern PLU, QVF statistikk fra Vega Scene simulert med bakgrunn av den kalibrerte modellen og historisk nedbør, samt generelle mengder for påslipp til offentlig overvanns- og fellesledninger i Oslo kommune. Det er sett på når de største avrenningstoppene for hvert år forekom, og alle er innenfor modellens kalibreringsområde, altså ikke ved snø eller snøsmelting. Det hadde vært foretrukket at modellen var bygd opp for å fungere ved disse hendelsene, og det kan tenkes at hendelser med nedbør og snøsmelting kunne endret QVF statistikken. Bidraget hadde i så fall ført til at avrenningsintensiteten hadde blitt høyere. IVF statistikken bygger på 55 års nedbør, mens QVF statistikken er simulert på bakgrunn av 21 års nedbør. Dette er dermed også en faktor som kan bidra til noe avvik i sammenligningen, sett mot hvis de hadde benyttet samme nedbørsdata.



Figur 3.9. Logaritmisk sammenligning av IVF statistikk, simulert QVF statistikk fra Vega Scene og generelle påslippstillatelser.

QVF statistikken for Vega Scene ligger tydelig under IVF statistikken for kortere intervaller. Dette viser at taket på Vega Scene har senket spissavrenningen betydelig, sammenlignet med det man kan forvente fra et tradisjonelt tak. Ved lengre intervaller blir forskjellen mindre. I tillegg er det tydelig at avrenningen fra Vega Scene flates ut for de kortere intervallene, der 1 minutt verdien ligger relativt likt som 10 minutt verdien. Noe som gjelder for alle gjentakintervallene. Mens IVF statistikken har en tydelig økning for de kortere intervallene, helt opp til 1 minutt verdien. Når det kommer til simulert QVF statistikk for Vega Scene ser man at denne ligger høyt i forhold til de generelle mengdene for påslipp til offentlig nett. Og det er kun 2 års avrenningen som ligger under påslipp for aktiv OV-ledning, mens ved for 20 års gjentakintervall ligger den omtrent 3 ganger høyere. Påslippsmengdene gjelder for fremtidens 5 års regn, og det må dermed tas hensyn til klimafaktor ved dimensjonerings. Både fremtidens IVF og QVF statistikk forventes dermed å være høyere enn i Figur 3.9, da denne bygger på historisk nedbør.

Et aspekt som ikke vises av Figur 3.9 er hvilke nedbørshendelser som fører til den avrenningen som QVF statistikken bygger på. Det er ikke nødvendigvis samme IVF som ble presentert, som førere til simulert QVF. Fra Figur 3.7 og Figur 3.8, ser vi at en veldig intensiv nedbørshendelse førte til minimal avrenning, mens det var en betydelig lavere nedbørintensitet som førte til en høy avrenning. Kalibrert modell ser ut til å simulere godt med tanke på dette aspektet, noe som styrker muligheten for å simulere QVF på en god måte.

Fra tidligere masteroppgave om Vega Scene ble et symmetrisk blokkhyetogram for fremtidens 20 år nedbør med klimafaktor simulert, som ledet til en avrenning på i underkant av 2 l/s (Myhr, 2021). Dette tilsvarer omtrent 25 l/s*ha, som dermed er lavere enn påslipp for OV-ledning. Fra QVF statistikken i Figur 3.9 ser vi betydelig høyere verdier enn dette, og en mulig forklaring på dette er at modellen i denne oppgaven i større grad er bygd opp som et grønt tak som er lagd til å fungere for ulik type avrenning. Noe som varierer i stor grad med tanke på initialbetingelser og nedbørsvarighet. I tillegg er utformingen av avrenningskurven for hovedtaket annerledes, da det er lagt inn kurve for overløpet.

QVF statistikken for Vega Scene er simulert basert på den kalibrerte modellen. Da den største avrenningshendelsen i kalibreringsperioden lå på omtrent 15 l/s*ha altså rett under 2 års gjentakintervall, er det knyttet usikkerhet ved simulert avrenning med historisk nedbør. Usikkerhet er grunnet at det ikke har vært hendelser i kalibreringsperioden av en slik art som gir en så stor avrenning, og modellen er dermed ikke trent på denne type hendelser. I den største hendelsen ved kalibreringen, var vannhøyden i simuleringen slik at det akkurat gikk i overløp. I flere år ved historisk simulering, ble dette overskredet og dermed fulgte avrenningskurven over restriktoren, som ikke var begrenset i samme grad. Det antas at restriktorene dermed påvirket disse hendelsene i liten grad, utover det som observeres i kalibreringen. Og at taket dermed i stor grad virket mer som et vanlig grønt tak ved de aller største avrenningshendelsene. En høyere terskel før overløp hadde muligens kunnet redusert avrenningen mer.

4 Konklusjon

Oppgaven hadde som mål å kalibrere en modell som beskriver avrenningen fra Vega Scene ved hjelp av global optimalisering ved hjelp av differensiell evolusjon. Samt å validere modellen. Resultatet av kalibreringen gir gode resultater med en KGE for kalibreringsperioden på 0.91 og 0.86 for valideringsperioden.

Det blir også undersøkt hvordan avrenningen fra Vega Scene ville vært i et historisk perspektiv, ved å lage en QVF statistikk ved å simulere avrenningen med bruk av historisk nedbør med den kalibrerte modellen. Simulert QVF statistikk ligger tydelig lavere enn IVF statistikken ved kortere varigheter. Spissavrenningen sammenlignet med det man kan forvente av tradisjonelle tak, er dermed betydelig redusert. For hendelser av lenger varighet blir forskjellene mindre. Simulert QVF statistikk sammenlignet med generelle grenser for påslipp til offentlige overvanns-

og fellesledninger i Oslo kommune, viser en avrenning fra Vega Scene som ligger for høyt til å overholde grensene.

4.1 Videre arbeid

I videre arbeid anbefales det å se på muligheter for å forbedre beregningen av fordampning i modellen, for å sikre riktige initialbetingelser. Det kan være aktuelt å se på om flere parametere enn temperatur kan benyttes. I tillegg anbefales det å se på muligheter for å simulere perioder med snø og snøsmelting, slik at modellen fungerer gjennom hele året.

Referanser

- Asplan Viak. *Blågrønt tak på Vega Scene*. <https://www.asplanviak.no/prosjekter/blaagroent-tak-paa-vega-scene/>
- Braskerud, B., & Paus, K. (2022). Retention of snowmelt and rain from extensive green roofs during snow-covered periods. https://www.researchgate.net/publication/365087764_Retention_of_snowmelt_and_rain_from_extensive_green_roofs_during_snow-covered_periods
- Cipolla, S. S., Maglionico, M., & Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416304608>
- Dominik Leutnat, A. D., Mathias Uhl. (2019). *swmmr - an R package to interface SWMM*. <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/1573062X.2019.1611889?needAccess=true&role=button>
- Gagolewski, M. (2022). *stringi: Fast and portable character string processing in R*. In <https://www.jstatsoft.org/article/view/v103i02>
- Grothendieck, A. Z. a. G. (2005). *zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series*. In <https://zoo.R-Forge.R-project.org/>
- Hamouz, V., & Muthanna, T. M. (2019). Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971931059X>
- Jeffers, S., Garner, B., Hidalgo, D., Daoularis, D., & Warmerdam, O. (2022). Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs. <https://www.chijournal.org/Journals/PDF/C484>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. <https://hess.copernicus.org/articles/23/4323/2019/>
- Leutnant, D., Döring, A., & Mathias, U. (2019). *swmmr - an R package to interface SWMM*. In <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1611889>
- Limos, A. G., Mallari, K. J. B., Baek, J., Kim, H., Hong, S., & Yoon, J. (2018). Assessing the significance of evapotranspiration in green roof modeling by SWMM. <https://iwaponline.com/jh/article/20/3/588/37916/Assessing-the-significance-of-evapotranspiration>
- Mullen, K., Ardia, D., Gil, D., Windover, D., & Cline, J. (2011). *DEoptim: An R package for global optimization by Differential Evolution*. In <https://CRAN.R-project.org/package=DEoptim>
- Myhr, I. A. (2021). *Modellering av grønt tak med mengdekontroll ved hjelp av SWMM Casestudie Vega Scene* <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2771786/Myhr2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Müller, K., & Wickham, H. (2023). *tibble: Simple Data Frames*. In <https://tibble.tidyverse.org/>
- NOU 2015: 16. (2015). *Overvann i byer og tettsteder - Som problem og ressurs*. Retrieved from <https://www.regjeringen.no/contentassets/e6db8ef3623e4b41bcb81fb23393092b/no/pdfs/nou201520150016000dddpdfs.pdf>
- Oslo kommune. (2017). *Overvannshåndtering - en veiledning for utbygger*. Retrieved from <https://www.oslo.kommune.no/getfile.php/134069-1486638143/Tjenester%20og%20tilbud/Plan%2C%20bygg%20og%20eiendom/Byggesa>

-
- [ksveiledere%2C%20normer%20og%20skjemaer/Overvannsh%C3%A5ndtering%20-%20Veileder%20for%20utbygger.pdf](#)
- Oslo kommune. (2022). *Veileder for overvannshåndtering – endringer oktober 2022*. Retrieved from <https://www.oslo.kommune.no/getfile.php/13464317-1664790183/Tjenester%20og%20tilbud/Plan%2C%20bygg%20og%20eiendom/Byggesa-ksveiledere%2C%20normer%20og%20skjemaer/Veileder%20for%20overvannsh%C3%A5ndtering%20endringer%202022-publiseres.pdf>
- Paus, K. H. (2016). *Hydraulisk vurdering av fordrøyning av overvann på tak*.
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. In R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rossmann, L. A. (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. In Schauburger, P., & Walker, A. (2022). *openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files*. In <https://ycphs.github.io/openxlsx/index.html>
- Statens vegvesen. (2022). V240 Vannhåndtering. <https://viewers.vegnorm.vegvesen.no/product/859952/nb?>
- Statlige planretningslinjer for klima- og energiplanlegging og klimatilpasning. (2018). *Statlige planretningslinjer for klima- og energiplanlegging og klimatilpasning*. Retrieved from <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2018-09-28-1469>
- US Environmental Protection Agency. (2020). <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Wickham, H., & Bryan, J. (2023). *readxl: Read Excel Files*. In <https://readxl.tidyverse.org>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. In <https://dplyr.tidyverse.org>

Vedlegg A

Kode brukt til sensitivitetsanalyse:

```
1 ~ #####
2 ~ ##### SENSITIVITETS-ANALYSE AV SWMM-MODELL #####
3 ~ #####
4
5 rm(list = ls())
6
7 library(swmmr) # Pakke med SWMM
8 library(readxl) # Pakke for å lese excel-filer
9 library(zoo) # Pakke for å lese SWMM-resultater
10 library(openxlsx) # Pakke for å skrive excel-filer
11
12 # Plassering av filer på Pcen, tilpasses lokalt
13 setwd("c:/Users/johan/Desktop/Masteroppgave/Eget_arbeid/sensitivitetsanalyse")
14
15 # Leser inn SWMM modellen med initialverdier
16 inp <- read_inp(x = "Master-NY.inp")
17
18 ###Parameter til sensitivitetsanalyse###
19 VAR_min <- 170 # Minste verdi variabelen kan ha
20 VAR_ref <- inp$lid_controls$Par1[3] # Sti til variabel i inp.fil, tilpasses for hver nye variabel som testes
21 VAR_max <- 230 # Største verdi variabelen kan ha
22 LEV <- 21 # Antall verdier som beregnes
23
24 ###Innledende beregninger###
25 # Lager en matrise for lagring av resultater
26 SA <- setNames(data.frame(matrix(ncol = 6, nrow = LEV)), c("VAR", "VAR/VAR_ref", "VOL", "VOL/VOL_ref", "Q_max", "Q_max/Q_max_ref"))
27 SA[1,1] <- VAR_min
28 for (i in 2:LEV){
29   SA[i,1] <- (VAR_max - VAR_min)/(LEV-1)+SA[i-1,1]
30 }
31 SA[,2] <- round(SA[,1]/VAR_ref,2)
32
33 # kjører SWMM-modellen med VAR_ref
34 write_inp(inp, "tempmodel.inp")
35 inp <- read_inp(x = "tempmodel.inp")
36 files <- run_swmm("tempmodel.inp", exec="c:/Program Files (x86)/EPA SWMM 5.1.014//swmm5.exe") # Tilpasses lokal plassering
37
38 # Henter ut resultater fra SWMM-simuleringen
39 out <- read_out(
40   file = 'c:/Users/johan/Desktop/Masteroppgave/Eget_arbeid/Sensitivitetsanalyse/tempmodel.out', # Sti til out file
41   itype = 1, # type: node
42   object_name = "1", # navn på node
43   vIndex = 4 # parameter ved node: total inflow
44 )["1"]$total_inflow # direkte tilgang til xts objekt
45
46 sim <- coredata(out)
47
48 VOL_ref <- sum(sim)*10*60*0.001 # Multiplisert med "10*60*0.001" for å få m^3, da data er i l/s med 10 min oppløsning
49 Q_max_ref <- max(sim)
50
51 ###Sensitivitetsanalyse###
52 for (i in 1:LEV){
53   # Sti til variabel i inp.fil, tilpasses for hver variabel som testes
54   inp$lid_controls$Par1[3] <- SA[i,1]
55
56   write_inp(inp, "tempmodel.inp")
57   inp <- read_inp(x = "tempmodel.inp")
58
59   files <- run_swmm("tempmodel.inp", exec="c:/Program Files (x86)/EPA SWMM 5.1.014//swmm5.exe") # Tilpasses lokal plassering
60
61   # Henter ut resultater fra SWMM-simuleringen
62   out <- read_out(
63     file = 'c:/Users/johan/Desktop/Masteroppgave/Eget_arbeid/Sensitivitetsanalyse/tempmodel.out', # Sti til out file
64     itype = 1, # type: node
65     object_name = "1", # navn på node
66     vIndex = 4 # parameter ved node: total inflow
67   )["1"]$total_inflow # direkte tilgang til xts objekt
68
69   sim <- coredata(out)
70
71   # lagrer resultatet i matrise for Sensitivitetsanalyse
72   SA[i,3] <- sum(sim)*10*60*0.001 # Multiplisert med "10*60*0.001" for å få m^3, da data er i l/s med 10 min oppløsning
73   SA[i,4] <- SA[i,3]/VOL_ref
74   SA[i,5] <- max(sim)
75   SA[i,6] <- SA[i,5]/Q_max_ref
76 }
77 ### Eksporterer resultater
78 write.xlsx(SA, "SA.xlsx", rowNames = FALSE)
79
```

Vedlegg B

Kode brukt til kalibrering, samt beregne KGE og BIAS for kalibrerings- og valideringsperioden:

```
1
2 #####
3 ###KALIBRERING OG VALIDERING AV SWMM MODELL###
4 #####
5
6 rm(list = ls())
7 start_time <- Sys.time()           # Starter tidtaking
8
9 library(DEoptim)                   # Pakke med global optimalisering via differensiell evolusjon
10 library(swmmr)                     # Pakke for å samhandle med SWMM
11 library(readxl)                    # Pakke for å lese excel-filer
12 library(zoo)                        # Pakke for å lese SWMM-resultater
13
14 setwd("C:/Users/johan/Desktop/Masteroppgave/Eget_arbeid/R_master") # Plassering av filer på pcen
15 obs <- read_excel("obs.kal-val.xlsx") # Laster inn observasjoner for Q
16
17 ##VARIABLER##
18 # Variabler som ønskes kalibrert med intervaller:
19
20 # soil-thickness hovedtak
21 v1_min <- 170
22 v1_max <- 230
23 # porosity
24 v2_min <- 0.3
25 v2_max <- 0.55
26 # soil-field capacity
27 v3_min <- 0.18
28 v3_max <- 0.25
29 # Soil-wilting point
30 v4_min <- 0.05
31 v4_max <- 0.17
32 # conductivity
33 v5_min <- 10
34 v5_max <- 500
35 # soil-Conductivity slope
36 v6_min <- 40
37 v6_max <- 60
38 # Drain.Mat. Rughness
39 v7_min <- 0.02
40 v7_max <- 0.2
41 # Storage Coeff
42 v8_min <- 200
43 v8_max <- 400
44
45
46 ###INNLEDENDE BEREGNINGER###
47 # Lager en matrise for beregning av kalibreringsparametere
48 cal <- setNames(data.frame(matrix(ncol = 2, nrow = nrow(obs))), c("obs", "sim"))
49
50 # Limer inn observasjonene i matrisen
51 cal[,1] <- obs
52
53 # Beregner statistikk for kalibreringsperioden
54 Qobs_avg <- mean(cal[1:35136,1])
55 s_obs <- sd(cal[1:35136,1])
56 sum_obs <- sum(cal[1:35136,1])
57
58 # Leser ukalibrert SWMM-modell og lager en midlertidig kopi (temp)
59 inp <- read_inp(x = "Master-NY.inp")
60 write_inp(inp, "tempmodel.inp")
61 inp <- read_inp(x = "tempmodel.inp")
62
63
64 ## OBJEKTIV-FUNKSJONEN ##
65 # Objektiv-funksjon tar variabler som argument (inngangsverdi) og beregner den negative av kge som resultatet
66
67 objfun <- function(x) {
68   # Definerer variabler
69   v1 <- x[1]
70   v2 <- x[2]
71   v3 <- x[3]
72   v4 <- x[4]
73   v5 <- x[5]
74   v6 <- x[6]
75   v7 <- x[7]
76   v8 <- x[8]
77
78   # Angir hvor variablene skal erstatte verdier i SWMM-modellen
79   inp$id_controls$Par1[3] <- round(v1,0)
80   inp$id_controls$Par2[3] <- round(v2,3)
81   inp$id_controls$Par2[7] <- round(v2,3)
82   inp$id_controls$Par3[3] <- round(v3,3)
83   inp$id_controls$Par3[7] <- round(v3,3)
84   inp$id_controls$Par4[3] <- round(v4,3)
85   inp$id_controls$Par4[7] <- round(v4,3)
86   inp$id_controls$Par5[3] <- round(v5,0)
87   inp$id_controls$Par5[7] <- round(v5,0)
88   inp$id_controls$Par6[3] <- round(v6,1)
89   inp$id_controls$Par6[7] <- round(v6,1)
90   inp$id_controls$Par3[4] <- round(v7,3)
91   inp$id_controls$Par3[8] <- round(v7,3)
92   inp$storage[1, 6] <- round(v8,0)
93 }
```

```

94
95 # Kjører SWMM-modellen med nye variabel-verdier
96 write_inp(inp, "tempmodel.inp")
97 inp <- read_inp(x = "tempmodel.inp")
98 files <- run_swmm("tempmodel.inp", exec="C:/Program Files (x86)//EPA SWMM 5.1.014//swmm5.exe") # Tilpasses lokalt
99
100 # Henter ut resultater fra SWMM-simuleringen
101 out <- read_out(
102   file = files$out, # path to out file
103   itype = 1, # type: node
104   object_name = "1", # name of node
105   vIndex = 4 # parameter at node: total inflow
106 )$total_inflow # directly access to xts object
107
108 # Beregner kge
109 sim <- coredata(out)
110 cal$sim <- sim
111 Qsim_avg <- mean(cal$sim[1:35136])
112 s_sim <- sd(cal$sim[1:35136])
113 r <- 0
114 if (s_sim > 0) {
115   r <- cor(cal$sim[1:35136], cal$obs[1:35136])
116 }
117 kge <- 1 - ((r - 1)^2 + (s_sim/s_obs - 1)^2 + (Qsim_avg/Qobs_avg - 1)^2)^0.5
118 return(-kge) # Velger å rapportere den negative verdien av kge da DEoptim vil søke etter en minimums-verdi
119 }
120
121
122 ##OPTIMALISERING VIA DIFFERENSIELL EVOLUSJON##
123
124 # Lager en vektor som representerer de laveste verdiene variablene kan ha
125 lower <- c(V1_min, V2_min, V3_min, V4_min, V5_min, V6_min, V7_min, V8_min)
126 # Lager en vektor som representerer de høyeste verdiene variablene kan ha
127 upper <- c(V1_max, V2_max, V3_max, V4_max, V5_max, V6_max, V7_max, V8_max)
128
129 # Kjører DEoptim for å finne globalt minimum
130 result <- DEoptim(objfun, lower=lower, upper=upper, DEoptim.control(
131   NP = 80, # Antall individer i populasjonen, min 10 multiplisert med antallet variabler
132   itermax = 1, # Antall generasjoner
133   F = 0.8, # Differensiell vektings-faktor
134   CR = 0.9)) # Sannsynligheten for at egenskaper ved individer overføres til neste generasjon
135
136
137 #SIMULERER MED KALIBRERT MODELL
138 # Leser ukalibrert SWMM-modell
139 inp <- read_inp(x = "Master-NY.inp")
140
141 # Endrer verdier på variabler i SWMM-modellen til optimale verdier
142 inp$id_controls$Par1[3] <- round(result$optim$bestmem[1],0)
143 inp$id_controls$Par2[3] <- round(result$optim$bestmem[2],3)
144 inp$id_controls$Par2[7] <- round(result$optim$bestmem[2],3)
145 inp$id_controls$Par3[3] <- round(result$optim$bestmem[3],3)
146 inp$id_controls$Par3[7] <- round(result$optim$bestmem[3],3)
147 inp$id_controls$Par4[3] <- round(result$optim$bestmem[4],3)
148 inp$id_controls$Par4[7] <- round(result$optim$bestmem[4],3)
149 inp$id_controls$Par5[3] <- round(result$optim$bestmem[5],0)
150 inp$id_controls$Par5[7] <- round(result$optim$bestmem[5],0)
151 inp$id_controls$Par6[3] <- round(result$optim$bestmem[6],1)
152 inp$id_controls$Par6[7] <- round(result$optim$bestmem[6],1)
153 inp$id_controls$Par3[4] <- round(result$optim$bestmem[7],3)
154 inp$id_controls$Par3[8] <- round(result$optim$bestmem[7],3)
155 inp$storage[1, 6] <- round(result$optim$bestmem[8],0)
156
157
158 # Kjører SWMM-modellen med nye variabel-verdier
159 write_inp(inp, "cal_model.inp")
160 inp <- read_inp(x = "cal_model.inp")
161 files <- run_swmm("cal_model.inp", exec="C:/Program Files (x86)//EPA SWMM 5.1.014//swmm5.exe")
162
163 # Henter ut resultater fra SWMM-simuleringen
164 out <- read_out(
165   file = files$out, # path to out file
166   itype = 1, # type: node
167   object_name = "1", # name of node
168   vIndex = 4 # parameter at node: total inflow
169 )$total_inflow # directly access to xts object
170
171
172 ##BEREGNINGER KALIBRERINGS-OBJEKTIVER##
173 sim <- coredata(out)
174 cal$sim <- sim
175
176 # Objektiver for hele perioden, både kalibrering og validering
177 Qsim_avg <- mean(cal$sim)
178 s_sim <- sd(cal$sim)
179 s_obs <- sd(cal$obs)
180 Qobs_avg <- mean(cal$obs)
181
182 r <- 0
183 if (s_sim > 0) {
184   r <- cor(cal$sim, cal$obs)
185 }
186 kge <- 1 - ((r - 1)^2 + (s_sim/s_obs - 1)^2 + (Qsim_avg/Qobs_avg - 1)^2)^0.5
187 bias <- sum(cal$sim)/sum(cal$obs)
188 nse <- 1 - sum((cal$sim-cal$obs)^2)/(sum((cal$sim-Qobs_avg)^2))
189 peak <- max(cal$sim)/max(cal$obs)

```



```

190
191 # objektiver for kalibrerings-perioden
192
193 Qsim_avg <- mean(cal$sim[1:35136])
194 s_sim <- sd(cal$sim[1:35136])
195 s_obs <- sd(cal$obs[1:35136])
196 Qobs_avg <- mean(cal$obs[1:35136])
197
198 r <- 0
199 if (s_sim > 0) {
200   r <- cor(cal$sim[1:35136], cal$obs[1:35136])
201 }
202 kge_k <- 1 - ((r - 1)^2 + (s_sim/s_obs - 1)^2 + (Qsim_avg/Qobs_avg - 1)^2)^0.5
203 bias_k <- sum(cal$sim[1:35136])/sum(cal$obs[1:35136])
204 nse_k <- 1 - sum((cal$sim[1:35136]-cal$obs[1:35136])^2)/(sum((cal$sim[1:35136]-Qobs_avg)^2))
205 peak_k <- max(cal$sim[1:35136])/max(cal$obs[1:35136])
206
207 # objektiver for validerings-perioden
208 Qsim_avg <- mean(cal$sim[52561:87696])
209 s_sim <- sd(cal$sim[52561:87696])
210 s_obs <- sd(cal$obs[52561:87696])
211 Qobs_avg <- mean(cal$obs[52561:87696])
212 r <- 0
213 if (s_sim > 0) {
214   r <- cor(cal$sim[52561:87696], cal$obs[52561:87696])
215 }
216 kge_v <- 1 - ((r - 1)^2 + (s_sim/s_obs - 1)^2 + (Qsim_avg/Qobs_avg - 1)^2)^0.5
217 bias_v <- sum(cal$sim[52561:87696])/sum(cal$obs[52561:87696])
218 nse_v <- 1 - sum((cal$sim[52561:87696]-cal$obs[52561:87696])^2)/(sum((cal$sim[52561:87696]-Qobs_avg)^2))
219 peak_v <- max(cal$sim[52561:87696])/max(cal$obs[52561:87696])
220
221
222 ### PLOTTER HYDROGRAMMER ###
223
224 cal$tid <- 1:nrow(cal)
225 plot(cal$tid, cal$obs, type = "l", col = "black", xlab = "Time [10min]", ylab = "Discharge [l/s]")
226 lines(cal$tid[1:35136], cal$sim[1:35136], col = "red")
227 lines(cal$tid[52561:87696], cal$sim[52561:87696], col = "green")
228 legend("top", legend = c("Observations", "Calibration", "Validation"), col = c("black", "red", "green"), lty = c(1, 2))
229
230 ## OPPSUMERER RESULTATENE ##
231
232 # Kalibrerings-objektiver
233 performance <- setNames(data.frame(matrix(ncol = 5, nrow = 3)), c("ANALYSE", "KGE", "NSE", "BIAS", "PEAK"))
234 performance[1,1] <- "Hele perioden"
235 performance[2,1] <- "Kalibrering"
236 performance[3,1] <- "Validering"
237 performance[1,2] <- round(kge,3)
238 performance[1,3] <- round(nse,3)
239 performance[1,4] <- round(bias,2)
240 performance[1,5] <- round(peak,2)
241 performance[2,2] <- round(kge_k,3)
242 performance[2,3] <- round(nse_k,3)
243 performance[2,4] <- round(bias_k,2)
244 performance[2,5] <- round(peak_k,2)
245 performance[3,2] <- round(kge_v,3)
246 performance[3,3] <- round(nse_v,3)
247 performance[3,4] <- round(bias_v,2)
248 performance[3,5] <- round(peak_v,2)
249
250 # Variabel-verdier
251 parameters <- setNames(data.frame(matrix(ncol = 8, nrow = 1)),
252   c("thickness hovedtak", "porosity", "field capacity", "wilting point",
253     "conductivity", "conductivity slope", "Drain.Mat. Roghness", "Storage coefficient"))
254 parameters[1,1] <- round(result$optim$bestmem[1],0)
255 parameters[1,2] <- round(result$optim$bestmem[2],3)
256 parameters[1,3] <- round(result$optim$bestmem[3],3)
257 parameters[1,4] <- round(result$optim$bestmem[4],3)
258 parameters[1,5] <- round(result$optim$bestmem[5],0)
259 parameters[1,6] <- round(result$optim$bestmem[6],1)
260 parameters[1,7] <- round(result$optim$bestmem[7],3)
261 parameters[1,8] <- round(result$optim$bestmem[8],0)
262
263 performance
264 parameters
265
266 end_time <- sys.time()
267 end_time - start_time
268
269
270

```

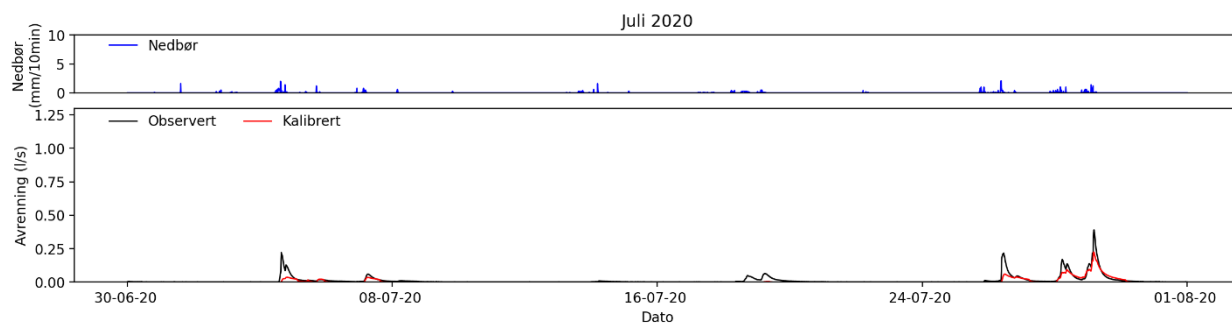
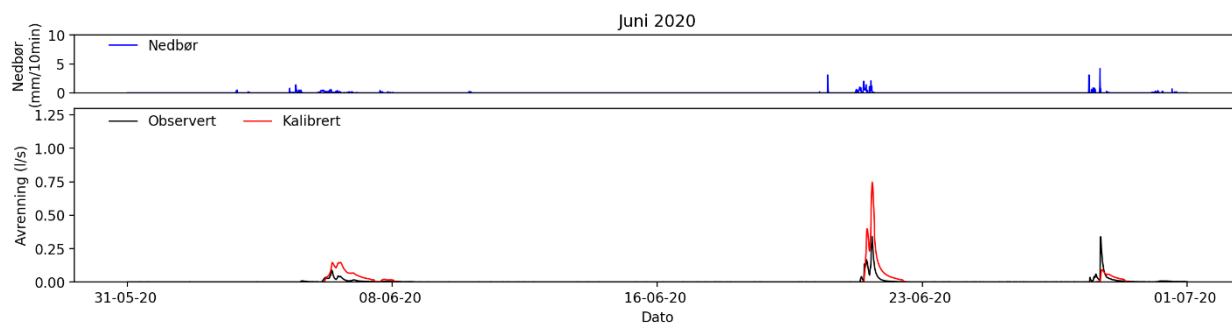
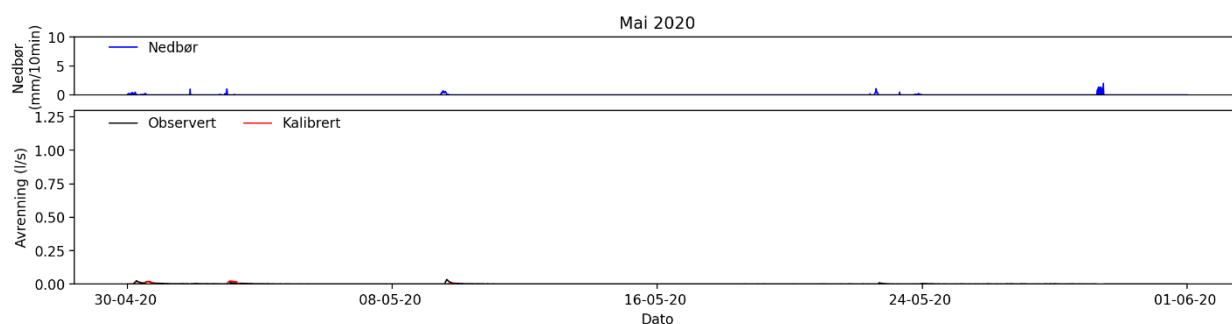
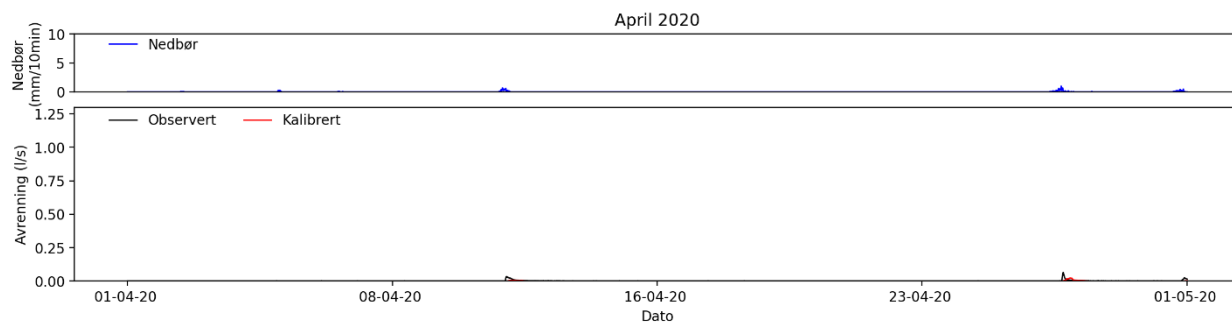
Vedlegg C

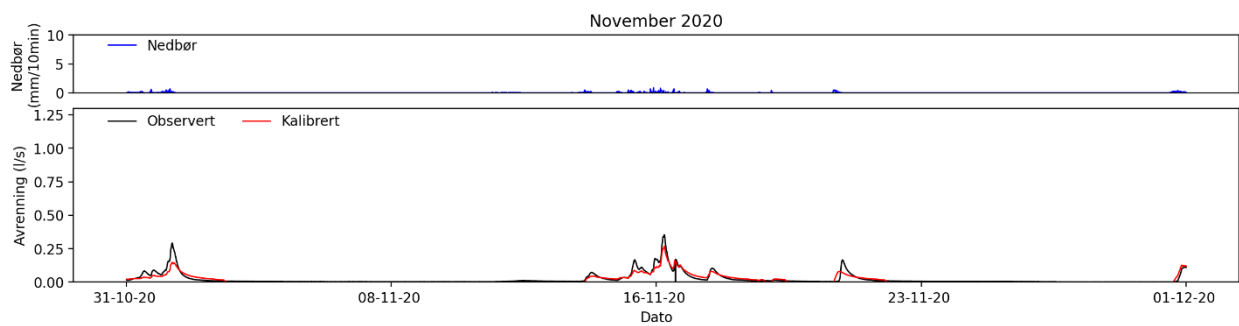
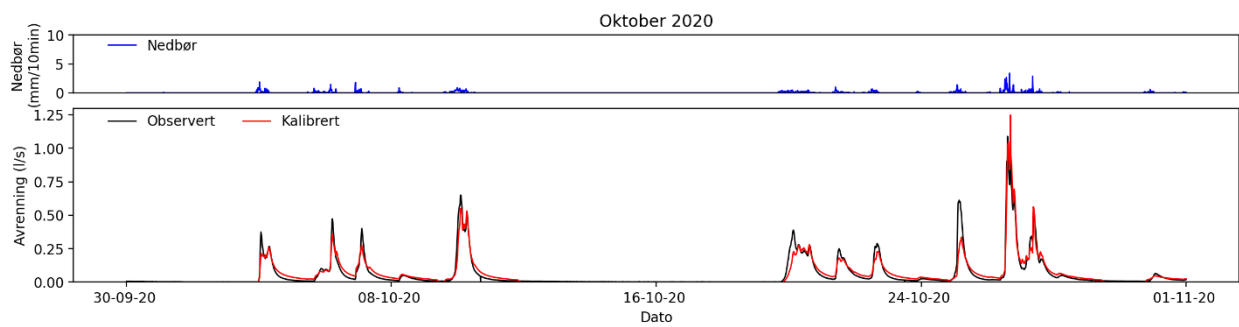
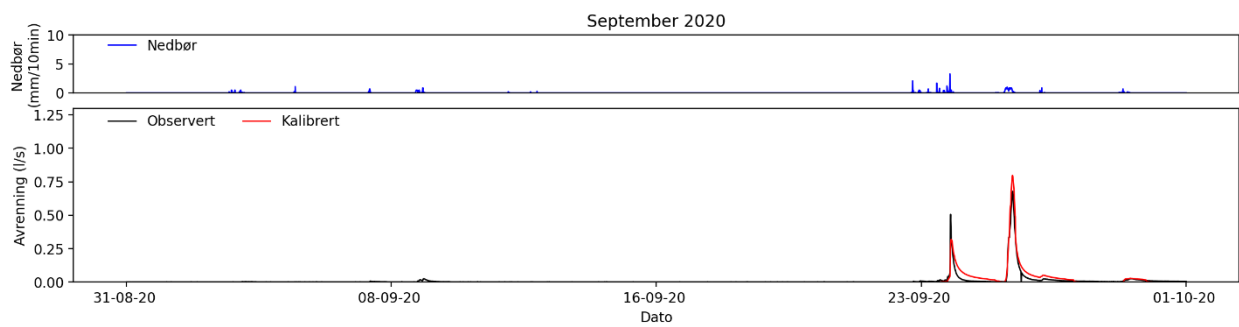
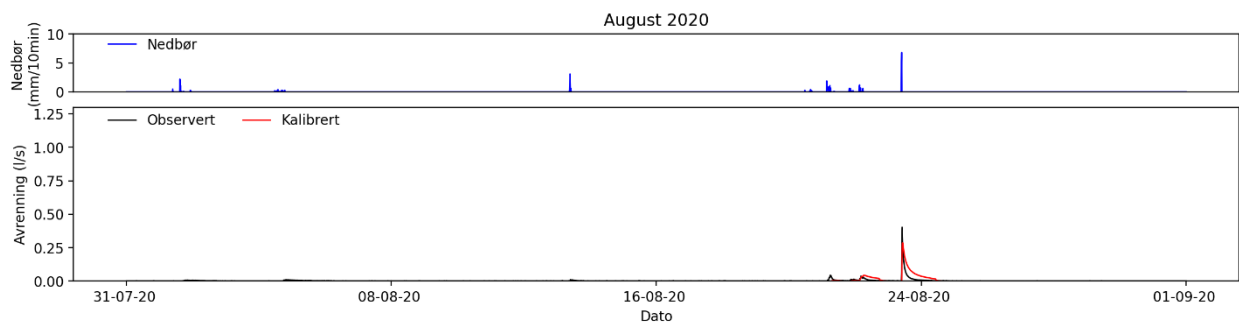
Kode brukt for å finne avrenning til beregning av QVF:

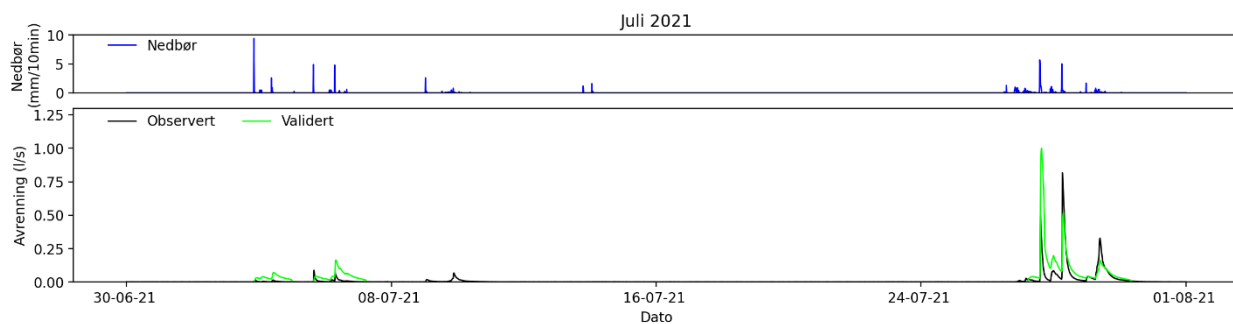
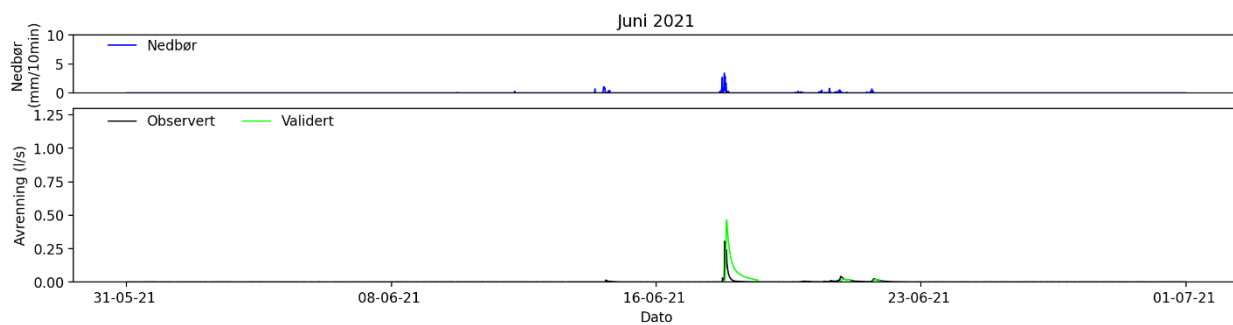
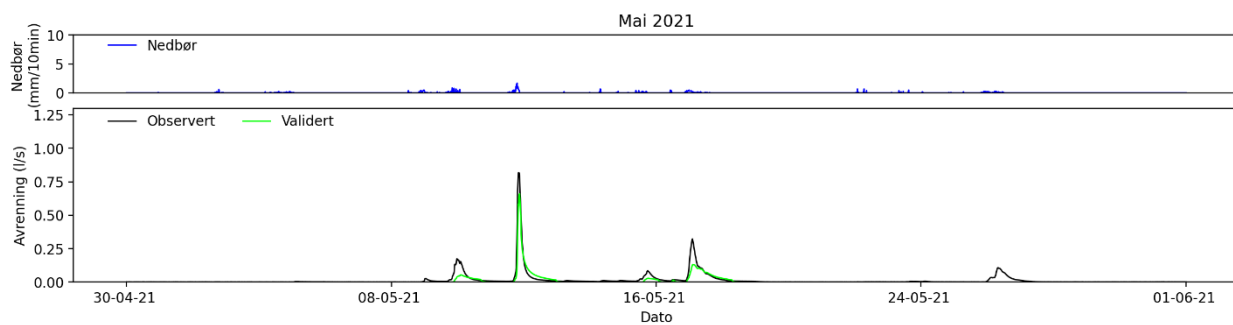
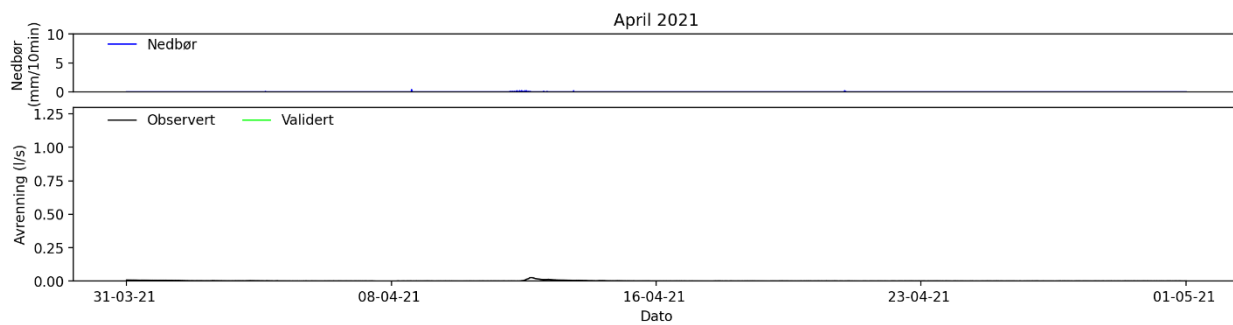
```
1 library(purrr)
2 library(readxl)
3 library(zoo)
4 library(tibble)
5 library(Rfast)
6 library(openxlsx)
7 library(swmmr)
8 library(stringi)
9 library(dplyr)
10 setwd("C:/Users/johan/Desktop/Masteroppgave/Eget_arbeid/R_master")
11 inp <- read_inp(x = "Master-Kalibrert.inp")
12 N <- 21
13 QVF <- setNames(data.frame(matrix(ncol = 10, nrow = N)),
14                 c("year", "h_max", "Q1", "Q5", "Q10", "Q30", "Q60", "Q180", "Q720", "Q1440"))
15 QVF$year <- 2002 : (2002 + N - 1)
16
17 for (j in 2002 : (2002 + N - 1)) {
18   inp$options[8,2] <- paste("01/01/", j, sep = "")
19   inp$options[10,2] <- inp$options[8,2]
20   inp$options[12,2] <- paste("12/31/", j, sep = "")
21
22   write_inp(inp, "tempmodel.inp")
23   inp <- read_inp(x = "tempmodel.inp")
24   files <- run_swmm("tempmodel.inp", exec = "C:/Program Files (x86)//EPA SWMM 5.1.014//swmm5.exe")
25
26   # HENTER SWMM-RESULTATER FOR Q_ut
27   out <- read_out(
28     file = files$out, # path to out file
29     itype = 1, # type: node
30     object_name = "1", # name of node
31     vIndex = 4 # parameter at node: total inflow
32   )[[1]]$total_inflow # directly access to xts object
33
34   sim_o <- coredata(out)
35   calc <- setNames(data.frame(matrix(ncol = 9, nrow = nrow(sim_o))),
36                   c("Tid", "Q", "Q5", "Q10", "Q30", "Q60", "Q180", "Q720", "Q1440"))
37   calc$Tid <- seq(1, nrow(sim_o))
38   calc$Q <- sim_o
39
40   sum5 <- function(i) {
41     if (i > nrow(calc)-5-1) {
42       return(0)
43     } else {
44       return(sum(calc$Q[i:(i+5-1)]))
45     }
46   }
47   sum10 <- function(i) {
48     if (i > nrow(calc)-10-1) {
49       return(0)
50     } else {
51       return(sum(calc$Q[i:(i+10-1)]))
52     }
53   }
54   sum30 <- function(i) {
55     if (i > nrow(calc)-30-1) {
56       return(0)
57     } else {
58       return(sum(calc$Q[i:(i+30-1)]))
59     }
60   }
61   sum60 <- function(i) {
62     if (i > nrow(calc)-60-1) {
63       return(0)
64     } else {
65       return(sum(calc$Q[i:(i+60-1)]))
66     }
67   }
68   sum180 <- function(i) {
69     if (i > nrow(calc)-180-1) {
70       return(0)
71     } else {
72       return(sum(calc$Q[i:(i+180-1)]))
73     }
74   }
75   sum720 <- function(i) {
76     if (i > nrow(calc)-720-1) {
77       return(0)
78     } else {
79       return(sum(calc$Q[i:(i+720-1)]))
80     }
81   }
82   sum1440 <- function(i) {
83     if (i > nrow(calc)-1440-1) {
84       return(0)
85     } else {
86       return(sum(calc$Q[i:(i+1440-1)]))
87     }
88   }
89   calc$Q5 <- sapply(1:nrow(calc), sum5)
90   calc$Q10 <- sapply(1:nrow(calc), sum10)
91   calc$Q30 <- sapply(1:nrow(calc), sum30)
92   calc$Q60 <- sapply(1:nrow(calc), sum60)
93   calc$Q180 <- sapply(1:nrow(calc), sum180)
94   calc$Q720 <- sapply(1:nrow(calc), sum720)
95   calc$Q1440 <- sapply(1:nrow(calc), sum1440)
96
97   QVF$Q1[j-2001] <- round(max(calc$Q)/1,2)
98   QVF$Q5[j-2001] <- round(max(calc$Q5)/5,2)
99   QVF$Q10[j-2001] <- round(max(calc$Q10)/10,2)
100  QVF$Q30[j-2001] <- round(max(calc$Q30)/30,2)
101  QVF$Q60[j-2001] <- round(max(calc$Q60)/60,2)
102  QVF$Q180[j-2001] <- round(max(calc$Q180)/180,2)
103  QVF$Q720[j-2001] <- round(max(calc$Q720)/720,2)
104  QVF$Q1440[j-2001] <- round(max(calc$Q1440)/1440,2)
105 }
106 write_xlsx(QVF, "QVF_vega.xlsx", rowNames = TRUE)
```

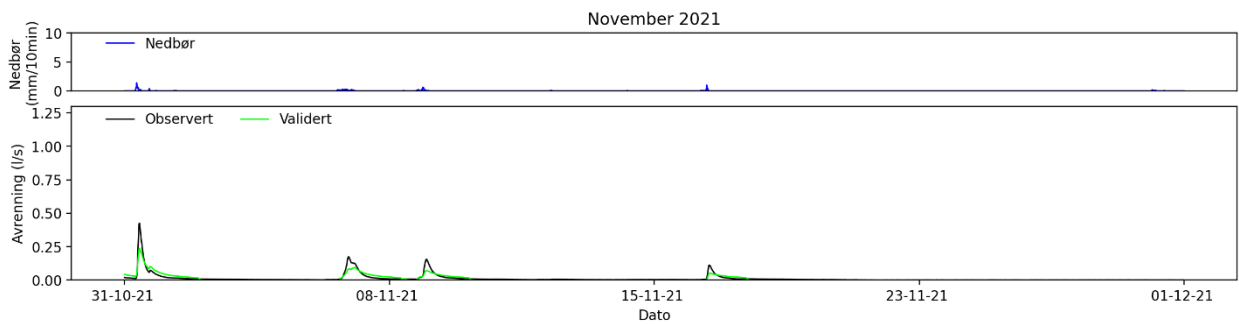
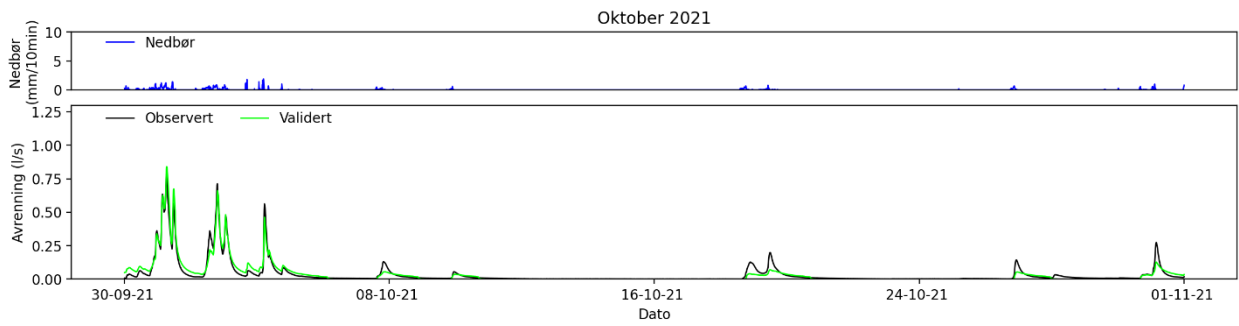
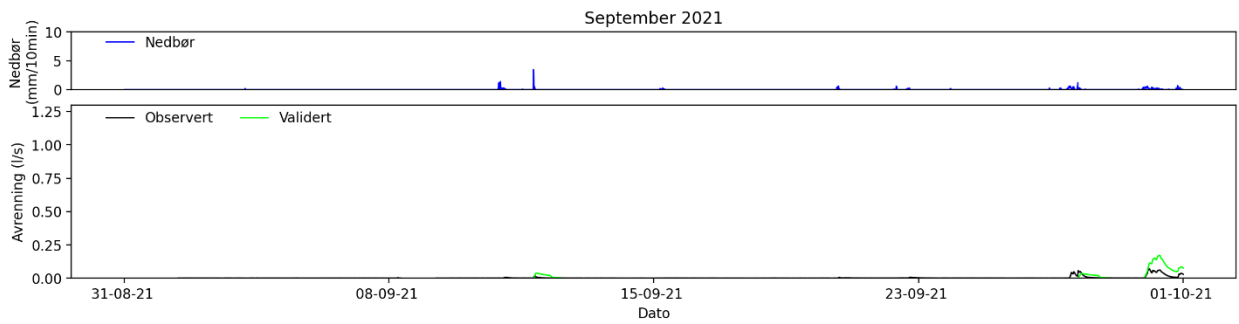
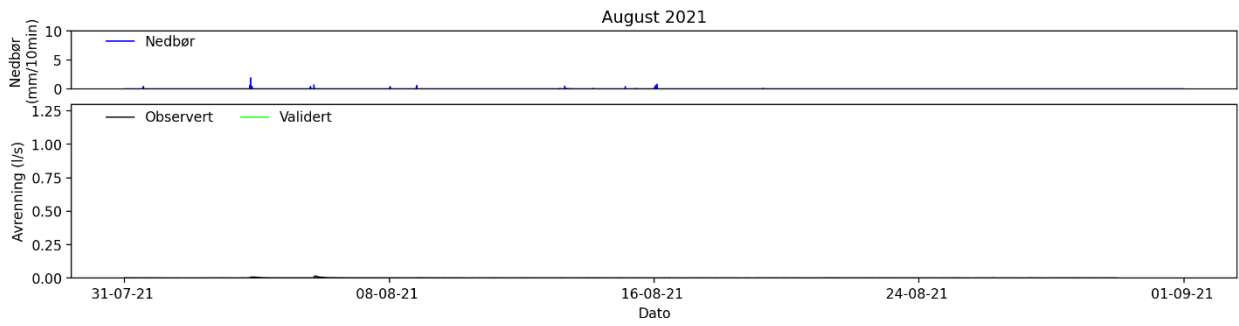
Vedlegg D

Figurer av simulert avrenning mot observert avrenning for hele kalibrerings- og valideringsperioden. Måned for måned, med like akser i alle figurer:













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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway