



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi - RealTek

Avrenning fra to grønne tak ved forskningsinfrastrukturen «Bia» i Ås kommune

Runoff from two green roofs at the «Bia» research
infrastructure in Ås municipality

Eivind Fordal

Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne avhandlingen markerer slutten på mitt studium ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, fakultet for realfag og teknologi (REALTEK). Avhandlingen utgjør 30 studiepoeng ved linja Vann- og miljøteknikk, og ble utført høsten 2018.

I denne anledning vil jeg gjerne takke de personer som har vært involvert i arbeidet med avhandlingen. Takk til min hovedveileder Jon Arne Engan, og biveiledere Stein B. Olsen og Svein Ole Åstebøl fra konsulentselskapet COWI. Dere hjalp meg mye med den innledende veiledningen, og med å komme i gang med oppgaveskrivingen. Takk til Vegard Nilsen, som har vært til stor hjelp med behandling av måledata og modellering i SWMM. Jeg vil også takke medstudent Jogeir Ueland og Knut M. Møen fra NVE for tilgang til måledata fra forsøksstakene i Bia.

Jon Arne ble dessverre sykmeldt tidlig i semesteret. Dette gjorde at det gikk en lengre periode der jeg ikke hadde noen hovedveileder. Heldigvis tok Jarle Tommy Bjerkholt på seg ansvaret som midlertidig veileder ved innspurten av avhandlingen. Takk til Jarle for gode tips og råd til oppgaveskrivingen.

Sammendrag

Denne avhandlingen presenterer feltresultater fra to ekstensive grønne tak og ett vanlig svart referansetak i forskningsinfrastrukturen Bia, lokalisert ved Planteskolen, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet i Ås, Akershus. Her registreres det kontinuerlige datamålinger av hydrologisk data, bla. nedbør i området og avrenning fra takene. Disse tre takene er referert til som GT1, GT2 og REF videre i avhandlingen. De grønne takene består av 40 mm tykke prefabrikkerte sedummatter som er anlagt oppå 150 mm tykke lag med finknust LECA.

Siden disse takene ble etablert våren 2018, var det begrenset hvor mye hydrologisk data som var tilgjengelig for bruk. I denne avhandlingen er det brukt datamålinger fra perioden 10.07.18 – 16.10.18. Det ble studert avrenning over hele måleperioden og ved to separate enkelthendelser med ulik intensitet og varighet. Resultatene viser at de grønne takene hadde en reduserende effekt på total avrenning (55,25 % og 52,17 %) for hele måleperioden. Det ble observert ett stort spenn i reduksjon av total avrenning ved de to enkelthendelsene, med ett av takene helt nede i kun 12,49 % reduksjon og høyeste på 53,05 %. Ved begge enkelthendelsene ble det observert reduksjon i avrenningstopp på over 90 %.

Modellen i EPA SWMM 5.1 som ble brukt til å beskrive den hydrologiske funksjonen var veldig enkel og fungerte dårlig til å predikere avrenning fra takene. For primærmodellen var NSME verdiene så lave som -0,97 for GT1 og -5,04 for GT2. Sekundærmodellen ga litt høyere verdier med 0,61 og 0,45. Ved en dimensjonerende nedbørshendelse med 20 års gjentakintervall og klimafaktor 1,4 klarte begge de grønne takene i modellen å holde tilbake all nedbør uten overflateavrenning. Med kvalitetssikring av målingene på forhånd og ett automatisk parametersøk for optimal kalibrering ville kanskje resultatene fra modellen vært bedre.

Da dataserien i denne avhandlingen kun dekker noen måneder i sommerhalvåret, er det også nødvendig med mer data for å kunne studere langtidseffekten til takene. Det er heller ikke mulig å undersøke hvordan takene ville fungert under vinterhalvåret og hvordan snødekke på takene påvirker avrenningen.

Abstract

This thesis presents field monitoring results of the runoff from two extensive green roofs and a normal black reference roof, at the Bia testbed located at Planteskolen at the Norwegian University of Life Sciences in Ås, Akershus (Norway). Hydrological data such as precipitation and runoff from the roofs are continuously registered from measurement tools on-site. The three roofs will be referred to as GT1, GT2 and REF throughout this thesis. The green roofs consist of 40 mm thick prefabricated modules above 150 mm thick layers of LECA material.

The testbed was created in the spring of 2018, and therefore it's only a limited amount of data that has been registered thus far. In this study, data from the period 10.07.18 – 16.10.18 was gathered and analyzed. Runoff measurements was analyzed over the entire period and during two separate rainfall events with different intensity and duration. The results presented show that both green roofs had a positive effect on reduction of total runoff volume for the entire period. During this period, they managed to reduce volume by 55,25 % and 52,17 %. For the two separate rainfall there was a bigger span in the reduction of runoff volume. One of the green roofs had a reduction of 12,49 % while the highest reduction was 53,05 %. For both events the reduction in peak runoff was above 90 %.

The model created in EPA SWMM 5.1 to describe the hydrological function of the two green roofs was very limited and did not give satisfying predictions of runoff. The primary model gave negative NSME values for both the green roofs (-0,97 and -5,04). The secondary model gave a better match with observed values and NSME values of 0,61 and 0,45 were achieved. For a constructed design storm in SWMM with a return period of 20 years and an added climate factor of 1,4 both green roofs managed to capture the entire rainfall volume without producing any surface runoff. If the data was quality checked beforehand and there was an option for automatic calibration, the results might've been better than in this thesis.

As the data from the testbed only covers a few months in late summer / early autumn, it would also be necessary to gather more data over a longer period of time to study the long-term effect of the green roofs, It's also not possible to analyze how the roofs would perform during the winter and how snow covering the roof surface would affect runoff measurements.

Innhold

1. Innledning.....	1
2 Litteraturstudium.....	2
2.1 Hydrologi og overvannshåndtering	2
2.1.1 Det hydrologiske kretsløpet	2
2.1.2 Urbanhydrologi og urbanisering	3
2.1.3 Klimaendringer	6
2.1.4 Overvannshåndtering	7
2.2 Grønne tak	9
2.2.1 Konstruksjonsoppbygging	9
2.2.2 Ekstensive grønne tak	10
2.2.3 Hydrologiske prosesser i grønne tak.....	12
2.2.4 Studier om fordrøyningsegenskapene til grønne tak	13
3. Forskningsinfrastrukturen Bia.....	15
4. Modellering av grønne tak i USEPA SWMM 5.1 LID Control Module	17
4.1 Tidligere studier.....	17
4.2 LID hydrologi	17
5. Modelleoppsett i SWMM 5.1	21
5.1 Oppbygning	21
5.4 Kalibrering.....	26
5.2 Primærmodell	30
5.3 Sekundærmodell	31
6. Resultater.....	33
6.1 Måledata fra Bia	33
6.2 Primærmodell.	36
6.3 Følsomhetsanalyse.....	39
6.4 Sekundærmodell.	40
6.5 Etterprøving	41
6.6 Dimensjonerende nedbørshendelse.	43
7. Diskusjon.....	45
8. Konklusjon.	48
9. Referanser.....	49
10. Vedlegg	53
Vedlegg 1.....	53
Vedlegg 2.....	54

Liste over figurer

Figur 1: Vannets kretsløp (USGV, 2016).....	3
Figur 2: Fordelingen av nedbør på overflate, før og etter urbanisering (Butler & Davies, 2010).....	4
Figur 3: Hvordan økende urbanisering påvirker utløpshydrogrammet (Butler & Davies, 2010).	5
Figur 4: Geografisk fordeling av kraftig nedbør i Norge. Ett døgn nedbør (mm/døgn) som overstiger 0,5 % av tilfellene i perioden 1971-2000 (Hanssen-Bauer, et al., 2015).	6
Figur 5: Geografisk fordeling av nedbør i Norge. 1-times nedbør (mm/time) med 5 års gjentakintervall (Hanssen-Bauer, et al., 2015).	7
Figur 6: Treleddstrategien (Lindholm, et al., 2008).	8
Figur 7: Lagvis oppbygning av ett typisk grønt tak (Snodgrass & McIntyre, 2010)	9
Figur 8: Typisk oppbygning av ett flatt og ett skrått sedumtak (Noreng, et al., 2012).	10
Figur 9: Hvordan jordfuktigheten endrer seg ved tørking og væting av jorda (Evans & Cassel, 1996).	13
Figur 10: Hydrogram som viser ett tilfeldig grønt tak plottet mot nedbørintensiteten. Svart strek = nedbør, striplet = avrenning fra grønt tak (Berndtsson, 2010).	14
Figur 11: De tre takene sett fra nord. Foto: S. Nyborg (Øyre & Trommald, 2018).	16
Figur 12: Sjiktoppbygging for de grønne takene (Øyre & Trommald, 2018).	16
Figur 13: Skjematisk fremstilling av en Bioretention Cell i SWMM (Rossman & Huber, 2016b).	18
Figur 14: Den mest nedbørsrike enkelthendelsen i måleperioden 09.09-10.09.	27
Figur 15: Nedbørshendelsen til etterprøving, 21.09.	27
Figur 16: Dimensjonerende nedbørshendelse. Varighet 60 min. Gjentakintervall 20 år. Klimafaktor 1,4.	29
Figur 17: Nedbør som falt i perioden 10.07.18-16.10.18.	33
Figur 18: Akkumulert nedbør og avrenning fra de tre takene i perioden 10.07.18-16.10.18. .	34
Figur 19: Akkumulert nedbør og avrenning i perioden 09.09-10.09.	35
Figur 20: Akkumulert nedbør og avrenning for hendelsen 21.09.	36
Figur 21: Hydrogram for primærmodellen.	37
Figur 22: Primærmodell for GT1.	37
Figur 23: Primærmodell for referansetak.	38
Figur 24: Primærmodell for GT2.	38
Figur 25: Følsomhetsanalyse av primærmodellen, presentert i stjernerdiagram. Forkortelser: Hydraulic conductivity(HC), Conductivity slope(CS), Porosity(Por), Field capacity(FC), Wilting point(WP), % Initially saturated(%IS), Flow coefficient(Fco), Void ratio(VR).	39
Figur 26: Hydrogram for sekundærmodellen.	40
Figur 27: Sekundærmodell GT1.	40
Figur 28: Sekundærmodell GT2.	41
Figur 29: Hydrogram for etterprøving av sekundærmodell.	42
Figur 30: Etterprøving av sekundærmodell, GT1.	42
Figur 31: Etterprøving av sekundærmodell, GT2.	43
Figur 32: Hydrogram for den dimensjonerende nedbørshendelsen.	44

Figur 33: IVF-kurve for Ås - Rustadskogen, Ås, Akershus. 1-60 minutters varigheter. Returperioder 2-200 år. Verdier i mm. (Norsk Klimaservicesenter, 2018). 53

Liste over tabeller

Tabell 1: Bruksområder og oppbygning for de ulike sjiktene i ett sedumtak (Noreng, et al., 2012).....	11
Tabell 2: Sjiktoppbygning i et sedumstak m/ blanding av urter og gress (Noreng, et al., 2012).	11
Tabell 3: Oppsett av Rain Gage i SWMM.	22
Tabell 4: Avrenningsfil lagt inn i Calibration Data i SWMM.	22
Tabell 5: Oppsett av GT1 i SWMM.....	23
Tabell 6: Oppsett av REF i SWMM.....	23
Tabell 7: Oppsett av tak 3 i SWMM.	23
Tabell 8: Oppsett av en Bioretention Cell i LID Control Editor i SWMM.....	24
Tabell 9: Forklaring av parameterne i en Bioretention Cell LID i SWMM.....	24
Tabell 10: Oppsett av LID Usage Editor in SWMM.	26
Tabell 11: Oppsett av ett symmetrisk regnhyetogram	28
Tabell 12: Parameterverdier for primærmodellen i SWMM.....	30
Tabell 13: Parameterverdier for sekundærmodellen i SWMM.....	31
Tabell 14: Maks(mm/t) og akkumulert(mm) nedbør og avrenning for hver måned og for hele perioden.	34
Tabell 15: Maks avrenning (mm/t), akkumulert/total avrenning (mm), tidspunkt for avrenningsstart og tidspunkt for maks avrenning i perioden 09.09-10.09.	35
Tabell 16: Maks avrenning (mm/t), akkumulert/total avrenning (mm), tidspunkt for avrenningsstart og tidspunkt for maks avrenning for hendelsen 21.09	36
Tabell 17: Total avrenning(mm), maks avrenning (l/s) og NSME verdier for de tre takene i primærmodellen.	38
Tabell 18: Maks økning/reduksjon i avrenningstopp (a.t) for hver av de justerte parameterne (+/- 50% justering av opprinnelig verdi) i primærmodellen.	39
Tabell 19: Total avrenning (mm), maks avrenning (l/s) og NSME verdier for de tre takene i sekundærmodellen.....	41
Tabell 20: Total avrenning (mm), maks avrenning (l/s) og NSME verdier for takene i etterprøving av sekundærmodell.	43
Tabell 21: Total avrenning (mm), maks avrenning (l/s), tid før maksimal avrenning inntraff (timer) og tid før avrenningsstart (timer) for den dimensjonerende nedbørshendelsen.	44
Tabell 22: Tabellvisning av IVF-kurven i figur 29. 1-60 minutters varigheter. Returperioder 2-200 år. Verdier i mm. (Norsk Klimaservicesenter, 2018).	54

1. Innledning

Den konstante utviklingen i urbane områder øker andelen tette flater, som skaper en barriere for naturlig drenering av overvann. Dette, i kombinasjon med klimaendringer og økende mengde, intensitet og hyppighet på nedbørshendelser, gjør at det kreves tiltak i den lokale overvannshåndteringen for å avlaste avløpsnett. Den tradisjonelle måten å slippe alt overvannet ut på avløpsnett har vist seg å ikke fungere da det meste av avløpsnett i Norge i dag er gammelt og ble dimensjonert for en helt annen tid. Lokal overvannshåndtering (LOH) er metoder for å håndtere vann lokalt så langt det lar seg gjøre gjennom tilbakeholdelse og fordrøyning. En av disse metodene er bruk av vegetasjonsdekkede tak (grønne tak). Grønne tak reduserer og forsinker maks- og volumavrenningen av overvann og vil derfor kunne fungere som ett fordrøyningsmagasin. Noen studier har vist at grønne tak kan gi en reduksjon opp mot 40-80 % i avrenningsmengde og 60-80 % i maksimal avrenning (Bengtsson, 2005; VanWoert, et al., 2005; Mentens, Hermy, & Raes, 2006; Getter, Rowe, & Andresen, 2007). Kapasiteten og funksjonen avhenger bla. av hvor tykt laget med vekstsubstrat er, om taket er drenert eller ikke, om det etableres et fordrøyningslag (av f.eks. knust LECA) under vekstsubstratet, om taket har strupet utløp, osv.

Våren 2018 ble det skrevet en masteroppgave ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) i Ås, der det ble etablert en forskningsinfrastruktur med grønne tak, kalt Bia (Øyre & Trommald, 2018). Det ble etablert to identiske ekstensive grønne tak med magasinerende sjikt (LECA), og ett vanlig svart referansetak. Fra NVEs målestasjon registreres det sanntidsmålinger av bla. nedbør, avrenning, temperatur, vekt, osv. Takene er relativt nye, så det er begrenset hvor mye data som er registrert hittil. Ett av målene med forskningsinfrastrukturen er at den skal kunne brukes til framtidige studier av fordrøyningseffekten til de grønne takene.

I denne avhandlingen skal den hydrologiske funksjonen til ekstensive grønne (sedum) tak med magasinerende sjikt undersøkes. Hovedmålet er å bruke tilgjengelig data fra Bia til å undersøke takenes evne til å holde tilbake nedbør. Det skal også lages en nedbør-avløpsmodell i programvaren USEPA SWMM (versjon 5.0.013). Delmålet er å evaluere nøyaktigheten til denne modellen og dens evne til å simulere avrenning fra de grønne takene. Det er kun nedbør- og avrenningsmålinger som vil bli undersøkt i denne avhandlingen. Målinger for vekt, temperatur, netto innstråling, osv. vil ikke bli tatt hensyn til. Derfor kan ikke faktorer som påvirker avrenningen, slik som fordampning og transpirasjon, fra takene regnes ut. Dette er hovedsakelig begrunnet med at det ikke har vært god nok tilgjengelig måledata. Ett eksempel på dette er at alle målingene for vekt av takene var feilaktig målt. Det er også noen faktorer som er ukjente, bla. vannopptaket til vegetasjonen på de grønne takene. En annen grunn er at disse faktorene ville gjort modellen mer komplisert og det ville krevd mer tid enn det denne avhandlingen har hatt til disposisjon.

2 Litteraturstudium

2.1 Hydrologi og overvannshåndtering

2.1.1 Det hydrologiske kretsløpet

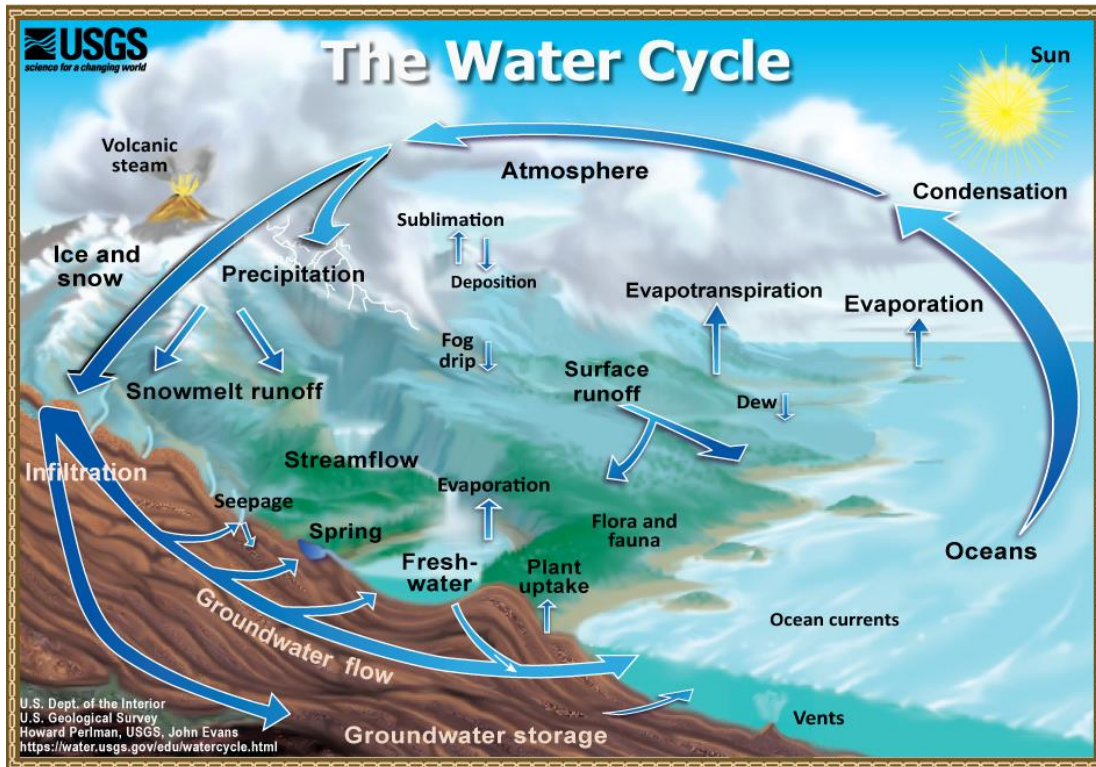
Hydrologi er læren om vannets forekomst, kretsløp og fordeling. Begrepet omfatter også vannets fysiske og kjemiske egenskaper, og hvordan det forandrer seg i forhold til omgivelser og menneskelig aktivitet.

Hydrologi handler for det første om vannets kretsløp. Når solen varmer opp havvannet blir det fordampet til vanndamp i luften. Fordampning er en prosess der vann blir omgjort fra væske til gass eller damp. Atmosfæren inneholder relativt små mengder vann (ca. 13000 km^3). Det er fordampning av hav, sjøer, innsjøer og elver som står for mesteparten av fuktigheten i atmosfæren (ca. 90 %). Siden verdenshavene utgjør et stort areal av jordens overflate (>70 %) fører dette til storskala fordampning. Vann tilføres også atmosfæren gjennom evapotranspirasjon. Dette er en prosess som inkluderer fordampning fra bakken, kapillærsone og fordunsting fra planter (fordampning fra planter og blader).

Vanndampen som tilføres atmosfæren må også tilbake til overflaten. Dette skjer gjennom kondensering og nedbør. Kondensering er enkelt sagt det motsatte av fordampning. Det er prosessen der vanndamp omdannes til væske. Det er gjennom kondensering at skyer dannes, som igjen fører til nedbør. Nedbør er vann frigjort fra skyer i form av regn, sludd, snø eller hagl. Atmosfærens vanninnhold er omtrent konstant, selv om det gir fra seg ca. 470000 km^3 vann som nedbør hvert år.

Nedbøren faller enten tilbake til havet, eller på bakken der det enten vil strømme på overflaten som avrenning, eller infiltrere ned i bakken. Omtrent 370000 km^3 faller på havene, mens 100000 km^3 faller på land. Avrenningen på overflaten som ikke infiltrerer ned i bakken vil ende opp i elver og innsjøer som fører vannet tilbake til havet. Årlig renner ca. 36000 km^3 vann fra elver ut i havet, som tilsvarer en middelvannføring på ca. $1140000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Av det vannet som infiltrerer ned i bakken vil noe holde seg nært jordoverflaten og lekke ut igjen som grunnvannutstrømning. Noe vil også renne ut gjennom åpninger i jordoverflaten og danne ferskvannskilder. Grunnvann nær overflaten vil bli tatt opp av planterøtter og fordunstet gjennom transpirasjon. Noe av vannet vil bevege seg dypt ned i jorda og fylle opp grunnvannsmagasiner (akviferer). Her kan det lagres store mengder ferskvann over tid. Grunnvann utgjør ca. 0,58 % av den totale vannmengden i vannets kretsløp. Figur 1 viser de hydrologiske prosessene som inngår i vannets kretsløp. (Thorolfsson, 2012) (USGV, 2016).



Figur 1: Vannets kretsløp (USGV, 2016).

2.1.2 Urbanhydrologi og urbanisering

Den delen av hydrologien som omfatter bebygde(urbane) områder kalles for urbanhydrologi. Urbanisering medfører inngrep i den naturlige hydrologiske syklusen. Utbygging av byer og tettsteder fører til reduksjon av naturlig vegetasjon, økning av andel tette flater, naturlige flomveier blir rettet ut, osv. Naturlige grøfter og vannveger legges i rør/legges om, myrer, våtmarker, dammer, o.l. dreneres. Den naturlige infiltrasjon, forrøyning, absorpsjon og fordampning av regnvann reduseres kraftig og medfører en betydelig økning i overflateavrenning. (Thorolfsson, 2012).

Vannbalansen i et nedbørsfelt er gitt ved formelen fra (Dingman, 2008)

$$\Delta M = (P + G_{inn}) - (G_{ut} + ET + Q) \quad (1)$$

hvor

ΔM = endring i feltets vannmagasinering

P = nedbør som treffer feltet

Q = avrenning på overflaten av feltet

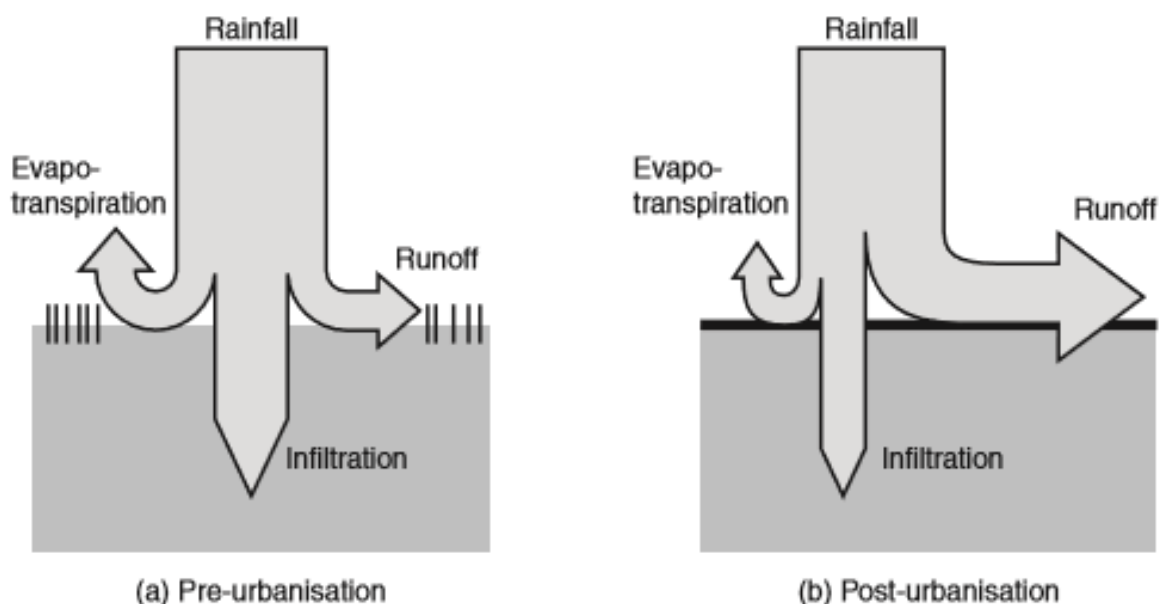
G_{inn} = grunnvannsinstrømning til feltet

G_{ut} = grunnvannsutstrømning fra feltet

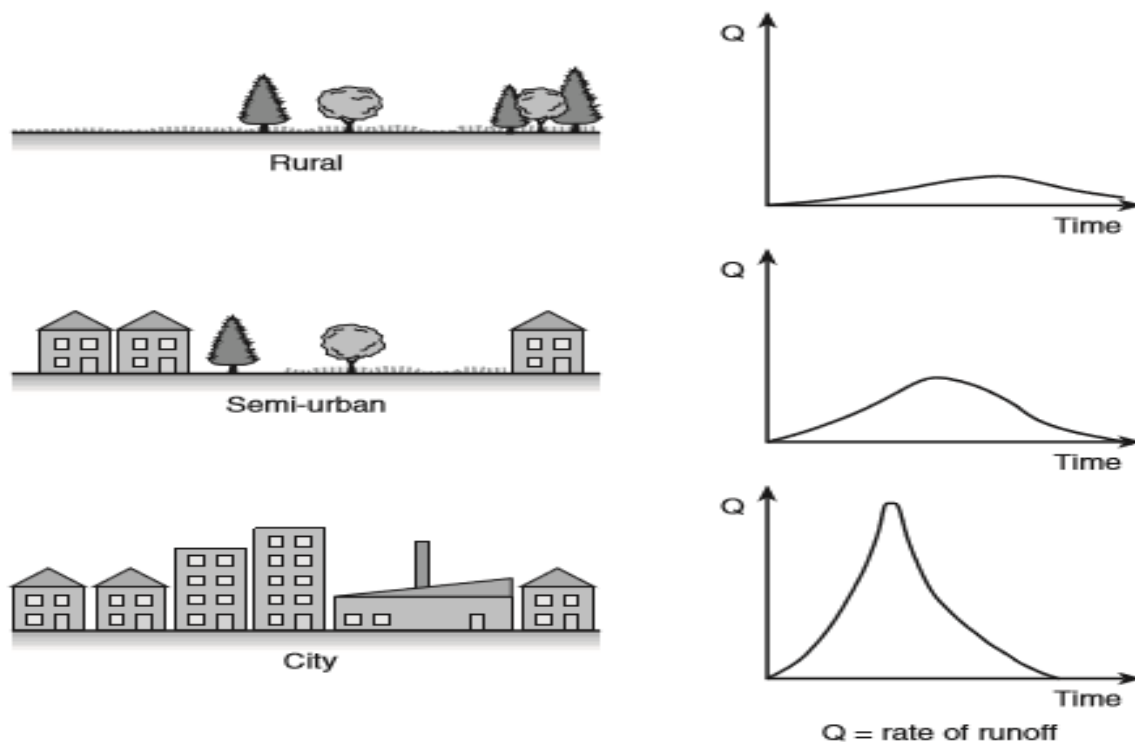
Overvann forflytter seg raskere på harde og tette flater, og gjennom avløpet, enn på naturlige overflater og langs naturlige strømningsveier. Dette fører til at vannstrømmen som renner av på overflaten både starter og «dør ut» tidligere, som igjen fører til økt avrenningstopp. Utbygging av byer og tettsteder er en faktor som har stor påvirkning på avrenningen. Ifølge en studie fra Leipzig ble det i perioden 1870-2003 vist at 75 % av nedbøren endte opp som overvann i områder av byen som var fullstendig forseglet. I disse områdene var andelen tette flater mellom 80-100 %. Studien viste også at fordampningen ble redusert og overvannsmengden økte med økende andel tette flater. I områder med 20-40 % tette flater ble fordampningen redusert med 100-150 mm/år, mens i områder med svært høy (80-100 %) andel tette flater ble fordampningen redusert med 450 mm/år. (Aarrestad, et al., 2015) (Regjeringen, 2015)

Figur 2 viser hvordan fordelingen av nedbør på overflaten påvirkes av urbanisering. Figur 2a viser hvordan en stor del av nedbøren enten går til infiltrasjon eller fordampning, før urbanisering. I figur 2b, etter urbanisering, går større deler av nedbøren til avrenning på overflaten. Dette er pga. at urbaniseringen fører til fortetting og svekkelse av den naturlige infiltreringen og fordampningen i området.

Figur 3 viser hvordan urbaniseringen påvirker avrenningens utløpshydrogram. Mindre vann vil infiltrere og fordampe/transpirere, og dermed vil avrenningen både få høyere maksverdi og bli mindre utjevnet over tid. Dette er en sentral problemstilling innenfor overvannshåndtering i byer og tettsteder. (Butler & Davies, 2010).



Figur 2: Fordelingen av nedbør på overflate, før og etter urbanisering (Butler & Davies, 2010).



Figur 3: Hvordan økende urbanisering påvirker utløpshydrogrammet (Butler & Davies, 2010).

Det er forventet økt befolkningsvekst i framtiden. Ifølge SSB vil befolkningsveksten i alle fylker i Norge øke fram mot 2040. Størst vekst i folketall framkommer i sentrale strøk. Oslo har en framskrevet vekst på rundt 140 000 fram mot 2040, og vil nå 700 000 innen fem år og 800 000 innen 20 år. Bergen vil nå 300 000 innen 15 år, Trondheim 200 000 innen fem år og Kristiansand 100 000 innen ti år (Statistisk Sentralbyrå, 2018). Befolkningsveksten setter press på grønnstrukturen i byer og tettsteder. Ifølge (Magnussen, Reinvang, & Løset, 2015) har andelen ubebygde areal i perioden 1994-2006 falt med 15,5 %, som følge av befolkningsvekst. Omkring 20 % av grønnstrukturen i byer og tettsteder i Norge ble bebygde i perioden 1999-2009.

I en annen studie fra NMBU ble det vist at i perioden 1996-2006 hadde Oslo mistet 7,7 kvadratmeter av natur- og grøntområder per innbygger, som tilsvarer en størrelse på 60 000 fotballbaner (Grande, 2018).

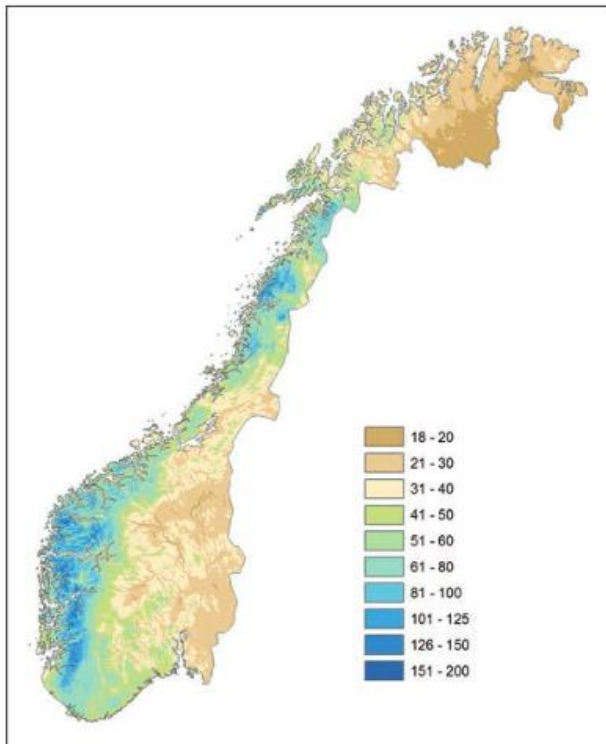
2.1.3 Klimaendringer

Klimaendringer er variasjoner i jordas globale eller regionale klima over en lang periode (flere tusen år). Det innebærer at det gjennomsnittlige været endrer karakter over tid, f.eks. mer/mindre nedbør, lavere/høyere temperatur, mer/mindre vind, osv. (Thorolfsson, 2012).

Temperatur

Ifølge den femte hovedrapport fra FN's klimapanel økte den globale temperaturen med 0,85 °C fra 1880 til 2012. Økningen i den globale oppvarmingen har vært på ca. 0.12 °C per tiår siden 1951. Det konkluderes med at det er svært sannsynlig at denne økningen er pga. klimagassutslipp fra menneskelig aktivitet. I Norge har temperaturen økt med 1 °C siden 1900. Med forutsetning om at klimagassutslippene øker i framtiden er det beregnet at temperaturen vil øke med 3-6 °C innen århundreskifte.

Nedbør

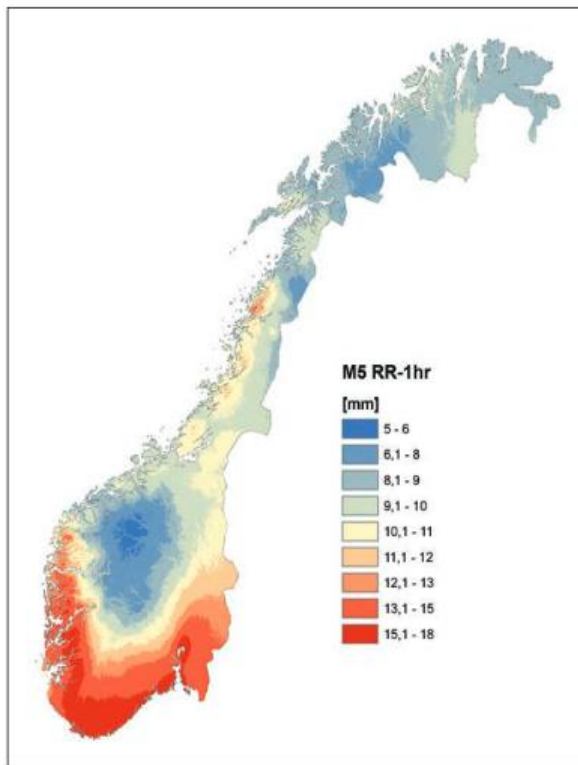


Figur 4: Geografisk fordeling av kraftig nedbør i Norge. Ett døgn-nedbør (mm/døgn) som overstiger 0,5 % av tilfellene i perioden 1971-2000 (Hanssen-Bauer, et al., 2015).

Middelnedbør: I Norge har langtidsutviklingen av nedbør vært omtrent lik i alle de 13 nedbørsregionene. Den gjennomsnittlige årlige nedbøren (middelnedbøren, mm/år) har økt med ca. 18 % siden 1990. Middelnedbøren har økt mest i Østfold og Sør-Vest-landet. Ifølge langtidsutviklingen av middelnedbøren øker den mest om høsten og våren, og minst om sommeren.

Ekstremnedbør: I perioden 1971-2000 har ekstremnedbøren langs store deler av Norskekysten i 0,5 % av nedbørstilfellene vært over 100 mm/døgn. Figur 4 viser den geografiske fordelingen av kraftig nedbør i Norge. De høyeste verdiene for kraftig nedbør er på Sørvest-Norge og på Helgelandskysten.

Det er Østlandet som har de største nedbørsverdiene med varighet fra ett minutt til en time, mens de største verdiene med varighet 1-6 timer er på Sørlandet. Varighet større enn 12 timer er størst på Vestlandet. Området rundt Oslofjorden, på Sørlandet og enkelte deler av Vestlandet har de største verdiene for 1-times nedbør med gjentaksintervall på 5 år. Figur 5 viser geografisk fordeling av nedbørmengder for 1 times nedbør med 5 års gjentaksintervall i Norge.



Figur 5: Geografisk fordeling av nedbør i Norge. 1-times nedbør (mm/time) med 5 års gjentakintervall (Hanssen-Bauer, et al., 2015).

Middel- og ekstremnedbør fram mot 2100:

Middelnedbøren vil øke med ca. 9 % ved midten av århundret sammenliknet med perioden 1971-2000. Dette er basert på et høyt utslippsscenario. Mot slutten av århundret vil den øke enda mer, ca. 18 %. På lands- og årsbasis vil antall dager med ekstremnedbør øke med ca. 89 % i slutten av dette århundret. Det er en generell økning i alle regioner og for alle årstider. Nedbørintensiteten for ekstreme hendelser vil også øke i framtiden. På årsbasis er det beregnet en økning i nedbørintensitet på 19 %. Størst prosentvis økning i nedbørintensitet vil inntreffe i Nord-Norge. Det tyder også på økningen i intens nedbør for varigheter mindre enn ett døgn vil øke rundt 30 % i gjennomsnitt for Norge. (Regjeringen, 2015) (Hanssen-Bauer, et al., 2015).

Ifølge en risikoanalyse utført av direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap er det svært sannsynlig at en av de 20 byene rundt Oslofjorden og Skagerrak vil bli rammet av styrtregn i løpet av de neste 50 årene. (DSB, 2016).

2.1.4 Overvannshåndtering

Den delen av nedbør og smeltevann fra snø som ikke infiltrerer ned i bakken, men renner av på overflaten, kalles overvann. Overvannet renner av på tette flater som tak, veier, gårds- og parkeringsplasser. Tradisjonelt sett har overvannshåndteringen skjedd ved avledning av overvannet i rørsystemer, for å fortrest mulig føres vekk til nærmeste resipient. Det viser seg at denne måten å håndtere overvann på er lite robust og framtidsrettet mtp. økende fortetting i byer og tettsteder, og klimaendringer med økende og mer intens nedbør.

I en framtidsrettet overvannshåndtering er den tradisjonelle måten lagt til grunn. Det er større fokus på å se på overvannet som en ressurs og at det skal håndteres lokalt. Vannet skal ledes åpent på overflaten og forsinkes på veien til resipienten. Dette kan oppnås gjennom løsninger som i størst mulig grad opprettholder den naturlige vannbalansen i området.

Det er 3 hovedmål som legges til grunn for overvannshåndtering i bebygde områder:

1. Forebygge skader.

Håndteringen av overvann skal gjøres på en måte som ivaretar innbyggernes liv og helse, og miljøet i området.

2. Utnytte overvann som ressurs.

Overvannet skal utnyttes som positivt landskapselement i området og brukes for rekreasjonsformål.

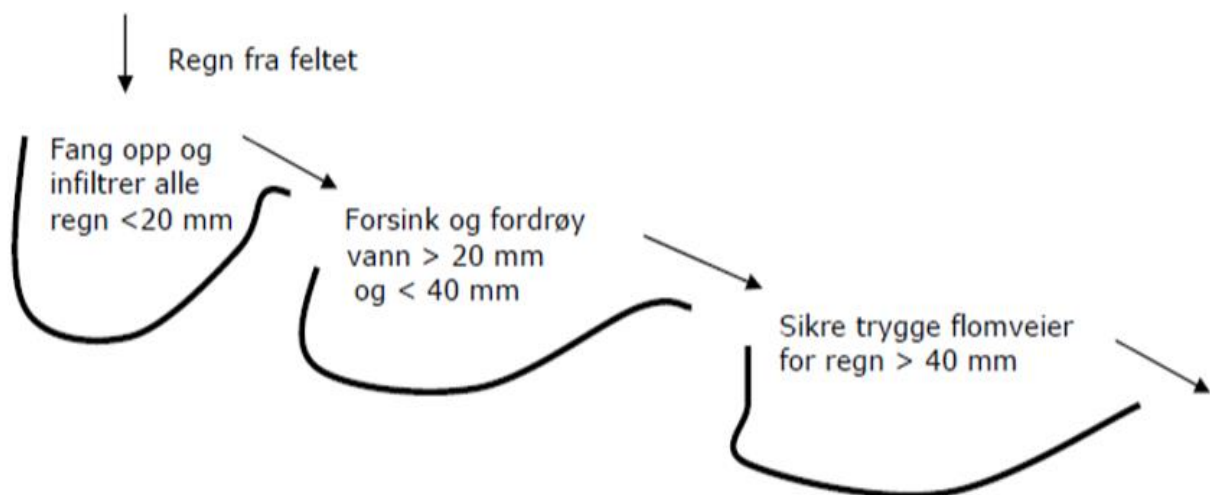
3. Styrke biologisk mangfold.

Gjennom infiltrasjon, åpne vannveier og dammer skal det biologiske mangfoldet i området bevares. (Åstebøl, Robba, Stenvik, Kristoffersen, & Olsen, 2013)

Filosofien bak lokal overvannshåndtering er å håndtere nedbøren der den faller (lokalt). Dette innebærer å la vannet finne naturlige veier via infiltrasjon i grunnen eller renne bort via åpne vannveier og dammer. Lokal overvannshåndtering kan:

- Redusere flombelastning til vassdrag
- Redusere forurensingstilførsel til vassdrag
- Frigjøre kapasitet på ledningsnett
- Redusere tilrenning til renseanlegg fra områder med fellessystem

En treleddstrategi er sentral i den lokale overvannshåndteringen. Strategien går ut på at tiltakene for håndtering av overvann deles i tre hovedgrupper ut ifra hvor mye nedbør som kommer. I første ledd skal vannet infiltrere eller holdes tilbake ved all nedbør mindre enn en viss mengde (<20 mm). Dette kan oppnås ved å bruke mer grønt som areal (mer trær, regnbed, grønne tak, eller mer bruk av gjennomtrengelige flater som porøs asfalt). I andre ledd skal nedbøren sendes videre til åpne anlegg som forsinker og fordrøyer vannet (> 20 mm, < 40 mm). Ledd 1 vil bidra her, mens overvannsdammer og areal for oversvømmelse kan bidra ytterligere til å forsinke og jevne ut avrenningsmengden. I tredje ledd skal vannmengder som er så store at normale systemer ikke kan håndtere det alene, avledes på en trygg måte gjennom åpne flomveier. Det kan avledes i åpne bekker, naturlige forsenkninger i terrenget eller i konstruerte veier med tilpasset helning og vinkel slik at vannet avledes til et egnet sted (fjord, sjø, elv, planlagt oversvømmelsesareal) uten å medføre skade. Nedbørsmengdene som er oppgitt i treleddstrategien (figur 6) er kun eksempler, og disse må tilpasses lokalt. (Thorolfsson, 2012) (Miljødirektoratet, 2016).



Figur 6: Treleddstrategien (Lindholm, et al., 2008).

2.2 Grønne tak

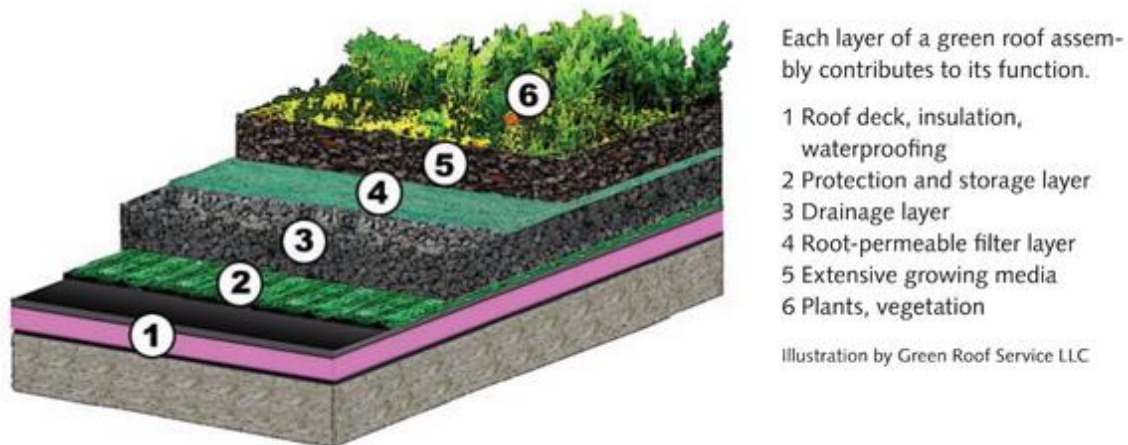
2.2.1 Konstruksjonsoppbygging

Grønne tak kan ha mange forskjellige oppbygninger. Typisk vil de være delt i flere horisontale lag, som alle er sentrale for systemets funksjonalitet.

Ifølge (Mentens, Raes, & Hermy, 2003) er det fem typiske lag i ett grønt tak:

- **Vegetasjon:** Vann i vegetasjonslaget går tilbake til atmosfæren gjennom evapotranspirasjon, som øker potensialet for vannsamling i substratet. Vegetasjonslaget gjør også at overflateavrenningen bremses når substratet har nådd metningspunktet.
- **Vekstmedium/substrat:** Det laget som supplerer vann og næring til vegetasjonen. I substratet kan ekstra vann under nedbørperioder lagres midlertidig.
- **Filterlag:** Filteret blokkerer partikler i substratet fra å nå gjennom til drenslaget og potensielt blokkere og ødelegge mekanismen i laget.
- **Drenslag:** På horisontale tak er drenslag særdeles viktig for å unngå oppstuvning av vann på overflaten. Drenslaget kan opptre som ett ekstra vannreservoar for vegetasjonen på grønne tak.
- **Beskyttelseslag:** Beskytter bla. vann fra å infiltrere ned i den underliggende takkonstruksjonen.

I (Snodgrass & McIntyre, 2010) deles taket inn i 6 forskjellige lag. Eneste forskjellen er at det er tatt med taktekke og isolasjon i bunn, se figur 7.



Figur 7: Lagvis oppbygging av ett typisk grønt tak (Snodgrass & McIntyre, 2010)

Grønne tak deles ofte inn i tre hovedgrupper avhengig av substratdybde og type vegetasjon:

- Ekstensive grønne tak
- Intensive grønne tak
- Semi-intensive grønne tak

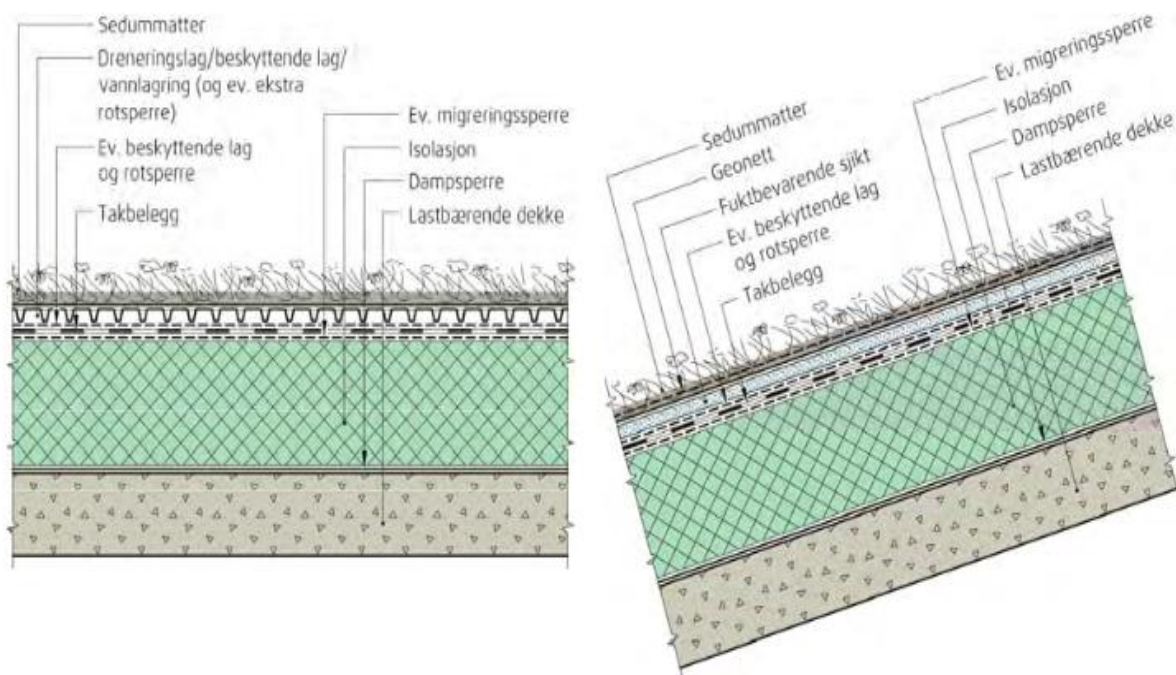
Ekstensive grønne tak har ett substratlag med en maksimumsdybde på ca. 150 mm, mens intensive tak har en substratdybde på >250 mm. Semi-intensive tak har en dybde på 150-250 mm. Det er sedum-arter som dominerer vegetasjonen på ekstensive tak, mens på intensive tak er det for det meste gress og små busker. På semi-intensive tak er det forskjellige urter og gress som står for mesteparten av vegetasjonen. Ideelt sett vil ett intensivt grønt tak med tykt

substrat og sterkt evaporerende vegetasjon være optimalt for overvannshåndtering. Men det er problematisk å anlegge intensive tak på bygninger pga. takets vekt og belastning på den underliggende konstruksjonen. Det er også vanskeligere å anlegge på konstruksjoner med stort fall, og krever mer kontroll og vedlikehold enn ekstensive tak. (Mentens, Hermy, & Raes, 2006) (Mentens, Raes, & Hermy, 2003).

2.2.2 Ekstensive grønne tak

Ekstensive grønne tak er veldig lette og krever lite vedlikehold, men som regel trengs det litt tilsyn i oppstartsfasen. De kan anlegges som prefabrikkerte matter eller tilsåes på ett underliggende vekstmedium. Ulike sedumarter brukes ofte på ekstensive grønne tak da disse krever lite vedlikehold og tåler store variasjoner i klima. De har også lite krav til jordsmonnet for å vokse, og kan overleve under ekstreme forhold. Det skilles gjerne mellom to typer ekstensive tak:

- **Sedumtak:** Vanlige sedumtak har lav byggehøyde (ca. 50-250 mm). Den totale vekten er ca. 35-40 kg/m² i tørr tilstand og ca. 50 kg/m² i vannmettet tilstand. Sedumtak kan bygges både som flate tak og skrånende tak. Konstruksjon og valg av sjikt kan variere med takfall og klima (Noreng, et al., 2012). Figur 8 viser hvordan ett typisk flatt og skrått sedumtak kan se ut. Tabell 1 viser oppbygningen av de ulike sjiktene i ett sedumtak og deres bruksområder.



Figur 8: Typisk oppbygning av ett flatt og ett skrått sedumtak (Noreng, et al., 2012).

Tabell 1: Bruksområder og oppbygning for de ulike sjiktene i ett sedumtak (Noreng, et al., 2012).

Sjikt	Eksempel på materialer	Eksempel på tykkelse (mm)	Flate tak	Skrå tak	Vått klima	Tørt klima
Plantedekke	Ulike sedumarter i bergknappfamilien	50 - 300	v	v	v	v
Vekstmedium	Masser fra lava, teglstein, finpukk e.l. og organisk materiale ($\leq 20\%$)	30	v	v	v	v
Geonett	Flere typer geonett er tilgjengelig, f.eks. stormasket nett av polypropylen			v		
Drenerende sjikt ¹⁾	Knasteplate med pålimt fiberduk Andre drenerende lag	10-15 5-40	v		v	
Vannlagrende sjikt ¹⁾	Knasteplate eller en litt tykk filt	10	v			v
Beskyttende sjikt ¹⁾	Knasteplate eller en litt tykk filt	10	(v)	(v)	(v)	(v)
Ekstra rotsperre	Rullprodukt av plast eller gummi	0,4-1,0	(v)	(v)	(v)	(v)
Takmembran	Takbelegg av asfalt, plast eller gummi	1,5-7,9	v	v	v	v
Isolasjon	Trykkfast isolasjon av mineralull eller EPS/XPS med trykkfasthet minst klasse CS(10)60	250-350	v	v	v	v
Dampspærre	PE-foli	0,2	v	v	v	v
Bærekonstruksjon	Betong, betongelementer, stålplater eller trekonstruksjoner	100-200	v	v	v	v

¹⁾ Materialsjiktene knasteplate med eller uten pålimt fiberduk og/eller tykk filt kan betjene flere av funksjonene drenering, vannlagring/fuktbevaring samt beskyttelse/rotsperre litt avhengig av utforming.

V: Sjiktet vil normalt bli benyttet.

(v) Benyttelse av sjiktet avhenger av bruksområde og utforming.

- **Sedumtak m/ blanding av urter og gress:** Disse takene er også lette, og veier ca. 130 kg/m² i vannmettet tilstand. Byggehøyden er ca. 120 mm. De kan bygges både som skrå- og flate tak (Noreng, et al., 2012). Tabell 2 viser hvordan sjiktoppbygningen kan se ut.

Tabell 2: Sjiktoppbygning i et sedumtak m/ blanding av urter og gress (Noreng, et al., 2012).

Sjikt	Eksempel på materialer	Eksempel på tykkelse (mm)
Plantedekke	Ferdige vegetasjonsmatter	50
Vekstmedium	Vekstjord iblandet lette masser	30-50
Vannlagrende sjikt	Filt	2-5
	Mineralull	30-50
Drenerende sjikt	Knasteplate med pålimt fiberduk	10-15
Ekstra rotsperre	Rullprodukt av plast eller gummi	0,4-1,0
Takmembran	Takbelegg av asfalt, plast eller gummi	1,5-7,9

2.2.3 Hydrologiske prosesser i grønne tak

Det er hovedsakelig to prosesser som beskriver den hydrologiske funksjonen til grønne tak.

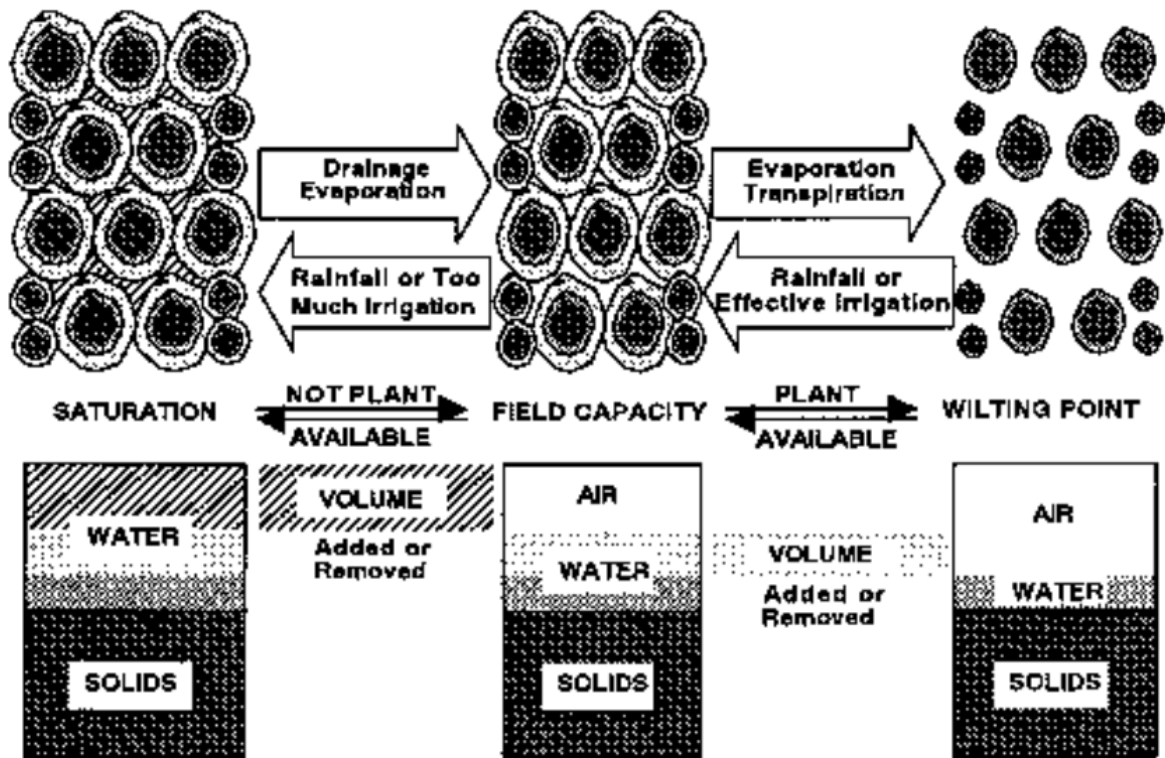
Retensjon: substratets evne til å permanent holde tilbake vann, som senere forsvinner gjennom evapotranspirasjon. Dette er den første prosessen som skjer når nedbør infiltrerer ett grønt tak. Teoretisk sett vil det ikke produseres avrenning fra ett grønt tak så lenge nedbørmengden som infiltrerer overflaten holder seg under takets feltkapasitet.

Detention: skjer når nedbørmengden overstiger feltkapasiteten til taket. Da klarer taket kun å midlertidig holde vannet tilbake, som reduserer og utsetter avrenningstoppen, og øker den totale avrenningsperioden (Johannessen, Muthanna, & Braskerud, 2018). (De-Ville, Menon, Jia, Reed, & Stovin, 2017).

Fuktighetsinnholdet er en indikasjon på hvor mye vann som er tilstede i jorda til enhver tid. Det blir gjerne uttrykt som dybden av vann per meter jordlag (mm/m) eller som prosent av jordvolumet (% av m^3). I perioder med mye nedbør eller annen form for tilførsel av vann, vil porene i jorda fylles opp, og fuktinnholdet vil øke. Hvis alle porene fylles helt, sies det at jorda er mettet. Fuktighetsinnholdet ved mettet tilstand er 100 % eller lik porøsiteten til jorda. I denne tilstanden er all luft i porene erstattet med vann. Planter vil ikke kunne overleve lenge under disse forholdene. Perioden der jorda er mettet varer vanligvis ikke lenge.

Når tilførsel av vann avtar vil deler av vannmengden i de store porene i jorda bevege seg vertikalt nedover pga. tyngdekraften (perkolasjon/drenering). Perkolasjonen gjennom jordlaget varer helt til fuktighetsinnholdet når feltkapasiteten. Ved feltkapasitet er de store porene fylt med både vann og luft, mens de små porene er fortsatt fulle av vann.

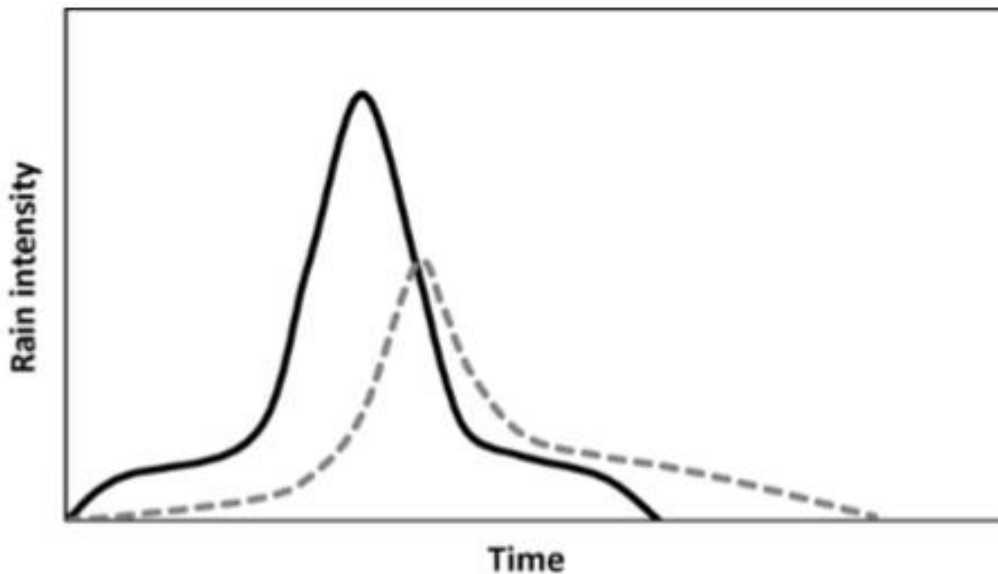
Resten av den tilgjengelige vannmengden i jorda vil enten tas opp av planterøtter(intersepsjon) eller fordampes i topplaget. Forutsatt ingen ny tilførsel av vann, vil jorda etter hvert tørke ut. Jo tørrere jorda blir, jo vanskeligere er det for plantene å ta til seg vann. Når fuktighetsinnholdet er så lavt at det ikke er tilstrekkelig for plantene, vil de visne. Dette defineres som jordas visnepunkt. Det er fortsatt litt vann tilstede, men det er ikke tilgjengelig for planterøttene. Figur 9 gir en oversikt over hvordan vanninnholdet endrer seg ved tørking og væting av jorda.



Figur 9: Hvordan jordfuktigheten endrer seg ved tørking og væting av jorda (Evans & Cassel, 1996)

2.2.4 Studier om fordrøyningsegenskapene til grønne tak

Ett grønt tak kan endre avrenningsmønsteret i forhold til ett vanlig tett tak ved å redusere avrenningsmengden, dempe avrenningstoppen, utsette tiden før avrenningstoppen inntreffer og utsette tiden før avrenningen starter. Dette skjer ved at noe av nedbøren holdes tilbake i taket gjennom retensjon og detensjon (se delkapittel 3.3). Prinsippet er vist i figur 10. Hvor store disse endringene er kommer an på flere faktorer både interne i konstruksjonen (type vegetasjon, tykkelse på substrat, med/uten underliggende magasin, takvinkel, takets alder, fuktinnhold før nedbørsstart, osv.) og eksterne (type klima i området, med/uten snødekke på taket, nedbørintensitet, temperatur, osv.). Det er derfor ikke noe fasitsvar på hvor stor fordrøyningseffekten til grønne tak er.



Figur 10: Hydrogram som viser ett tilfeldig grønt tak plottet mot nedbørintensiteten. Svart strek = nedbør, striplet = avrenning fra grønt tak (Berndtsson, 2010).

Noen studier har vist at grønne tak kan gi en reduksjon opp mot 40-80 % i avrenningsmengde og 60-80 % i maksimal avrenning (Bengtsson, 2005; VanWoert, et al., 2005; Mentens, Hermy, & Raes, 2006; Getter, Rowe, & Andresen, 2007). Utsettelse av avrenningstopp har blitt observert mellom 0-30 min i forhold til tradisjonelle tak (VanWoert, et al., 2005; Carter & Rasmussen, 2006; Getter, Rowe, & Andresen, 2007), mens i (Villarreal & Bengtsson, Response of a Sedum green-roof to individual rain events, 2005) ble det observert ned mot 1 minutt. DeNardo (Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs, 2005) fant at grønne tak reduserte avrenningstopp fra en gjennomsnittlig nedbørintensitet på 4,3 mm/t til en gjennomsnittlig avrenning på 2,4 mm/t. De grønne takene utsatte starten på avrenningen med 5,7 timer og avrenningstopp med 2 timer i gjennomsnitt.

Hvor lenge de grønne takene er studert og hvor mange nedbørshendelser som er tatt med har noe å si for hvor stor fordrøynings-effekten er. Det ble funnet i ett utvalg storskala langtidsstudier av ekstensive grønne tak at de klarte å holde tilbake ca. 50-78 % av all nedbøren. For kortere studier (>6 måneder) ble det observert lavere tilbakeholdelse av nedbør (Voyde, Fassman, & Simcock, 2010).

I (Carter & Rasmussen, 2006) ble det undersøkt forholdet mellom ett grønt taks evne til å holde tilbake nedbør, størrelsen på nedbørshendelsen og endringer i nedbørintensitet. De fant en invers sammenheng mellom mengde nedbør og mengde som ble holdt tilbake i taket. Av den totale nedbøren ble 88 % holdt tilbake for små hendelser (<25,4 mm nedbør), 54 % for middels store hendelser (25,4-76,2 mm) og 48 % for store hendelser (>76,2 mm).

Villarreal (Runoff detention effect of a sedum green-roof, 2007) fant at tilbakeholdelsen av vann var dårligere ved kontinuerlig tilførsel av nedbør enn om nedbøren kom i intense perioder. Reduksjonen var ca. dobbelt så stor ved intense perioder enn ved kontinuerlig tilførsel.

3. Forskningsinfrastrukturen Bia

Våren 2018 ble det etablert en forskningsinfrastruktur med grønne tak, kalt Bia (Øyre & Trommald, 2018). Tre forsøksstak ble etablert ved Planteskolen v/Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Denne infrastrukturen er ett forskningsprosjekt mellom LANDSAM og Fakultet for realfag og teknologi (RealTek) v/NMBU, Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE), Bergknapp AS, LECA NORGE AS og Protan AS. Takene eies av LANDSAM. Figur 11 viser forskningsinfrastrukturen sett fra nord.

To av konstruksjonene er ekstensive grønne tak med magasinerende sjikt (blå-grønn løsning), og det tredje er ett vanlig svart referanse tak. De prefabrikkerte sedumattene er av typen Bergknapp sedummix og har en tykkelse på 40 mm. Vekt ved tørr tilstand er 15 kg/m² og ca. 20 kg/m² når mattene er vannmettet. Det er opplyst at minst 95 % av overflaten på mattene er dekket med vegetasjon ved levering. En kort beskrivelse av mattene: «Stammen er av type TeMa MAT H1 L35 som er fylt med vekstmasse (lavasand blandet med organisk og uorganisk materiale (ihht Norsk Standard). Denne er sådd med sedumfrø i blanding, 6 –8 arter/varianter. Dette sikrer at det alltid vil være noen varianter som tilpasser seg det lokale miljøet/klima.» (Bergknapp, 2018, s. 2)

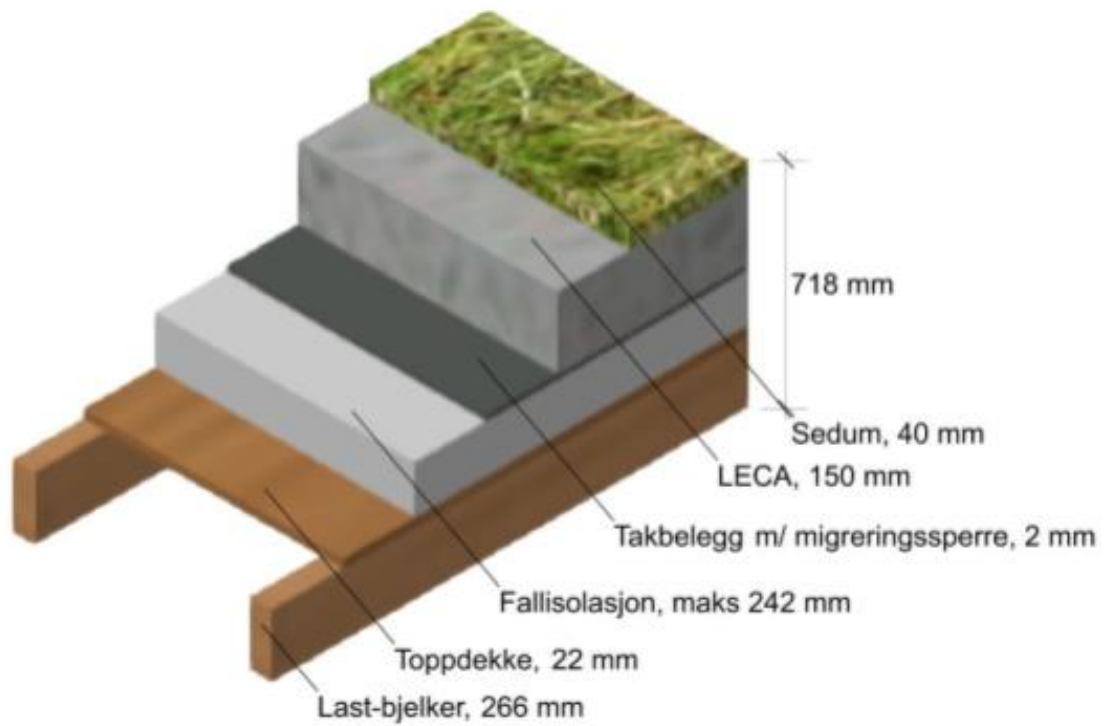
Det magasinerende sjiktet består av LECA materiale med høy permeabilitet, av typen Leca lettklinker Iso 10-20 coates. Tykkelse på laget er 150 mm. Dette er et spesialprodukt for isolasjon og frostsikring i grunnen, og har en gradering på 10-20 mm. Ifølge (Øyre & Trommald, 2018) ble det observert ulike kornstørrelser i sekkene med LECA som ble lagt utover takene. En kort beskrivelse av produktet: «Leca Lettklinker er et rent naturprodukt produsert av ekspandert leire. Det er et tilnærmet kuleformet granulat med et tett keramisk skall omkring en porøs kjerne.» (Leca, 2014, s. 1). LECA materiale under sedummattene virker som ett ekstra magasin og gjør at takene kan holde på mer nedbør.

Figur 12 viser sjiktoppbyggelsen til de grønne takene. Det totale sjiktet er 190 mm tykt (Sedum 40 mm, LECA 150 mm). Hvert av takene har et overflateareal på 50 m² (10x5 m), som gir et totalt overflateareal på hele konstruksjonen lik 150 m². Fallet på takene er 1:40. Det er ikke installert noe nødoverløp på takene. Sluk er plassert i hjørnet på hver av takene for å gjøre adkomst til slukene lettere. Minimumshøyden fra bakkenivå opp til rammekonstruksjonen måtte være på 1,25 m for å få plass til IBC-container under slukene.

Objektet helt nederst i venstre hjørne i figur 12 er en nedbørmåler av typen Pluvio2, som er lokalisert to meter unna det midterste taket, på nordøstlig side. Avrenning blir målt i en IBC-container, med en trykksensor av typen Seametrics Aquistar PT-12, som måler endringer vannivået. En millimeter økning i vannivået i containeren tilsvarer omtrent én liter vann. Containeren har en kapasitet på 1000 l. En pumpe med kapasitet på 230 l/s tømmer containeren for vann når det begynner å bli fullt. All data fra måleinstrumentene ved Bia er tilgjengelige fra NVEs database Sildre (NVE, 2018). Det er registrert målinger helt fra tidlig juli (10.07.2018). Det blir tatt sanntidsmålinger av bla. kumulativ nedbør, vannivå i bøtten, vekt av takene, osv. Det er p.d.d. ikke satt i gang noe arbeid med å kvalitetssikre datamålingene (personlig kommunikasjon, Jogeir Ueland, student, 25.10.18).



Figur 11: De tre takene sett fra nord. Foto: S. Nyborg (Øyre & Trommald, 2018).



Figur 12: Sjiktoppbygging for de grønne takene (Øyre & Trommald, 2018).

4. Modellering av grønne tak i USEPA SWMM 5.1 LID Control Module

4.1 Tidligere studier

Det er noen få publiserte studier som har prøvd å modellere grønne tak i SWMMs LID Control Module. Det finnes generelt lite dokumentasjon om kvaliteten på LID modellen. I en studie utført av (Burszta-Adamiak & Mrowiec, 2013) ble det modellert tre grønne tak som Bioretention Cells i SWMM. Modellerte verdier ble sammenliknet med empirisk data fra tre grønne tak og ett referansetak. Når modellen ble kalibrert for å overensstemme med totalt avrenningsvolum ble den maksimale avrenningen overestimert. Det kan være flere grunner til dette, bla:

- Vegetasjonsdekkets helning og type ble ignorert
- Temperatur, isolasjon, vind og andre faktorer som påvirker tørkingen av substratet og det magasinerende lag er ikke tatt med.
- Substratet hadde en høy hydraulisk konduktivitet, som gjorde at transport gjennom substratet ikke hadde noe reduserende effekt på avrenningen.

Det ble konkludert med at modellen ikke var tilstrekkelig til å modellere avrenning fra de grønne takene.

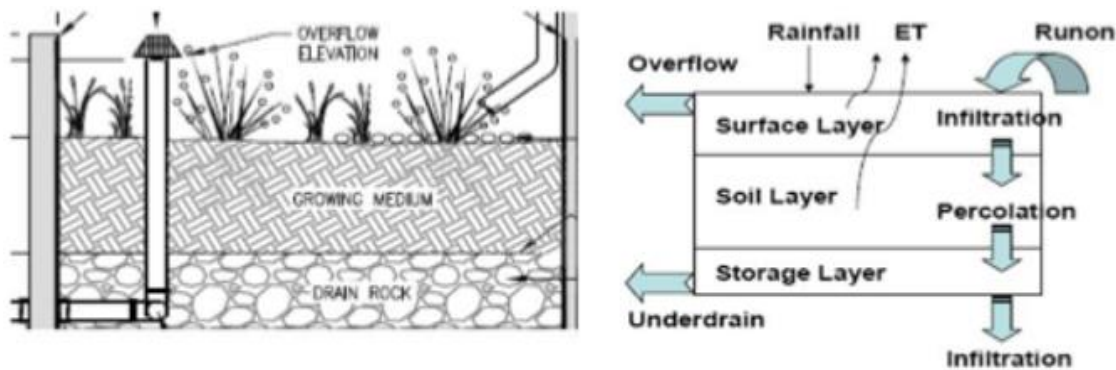
I en annen studie ble en Green Roof LID basert på laboratoriemålinger brukt til å simulere den hydrologiske responsen fra ett lite urbant nedbørsfelt. Det ble konkludert med at denne modellen var tilstrekkelig når parameterne i substratet var kalibrert godt nok (Palla & Gnecco, 2015).

Disse studiene så kun på enkelthendelser der fordampning fra taket ikke er tatt med. Det finnes også studier som har sett på langtidseffekten av grønne tak i SWMM. I (Cipolla, Maglionico, & Stojkov, 2016) ble det lagd en numerisk modell i SWMM, som ble kalibrert og validert med feltmålinger. Den hydrologiske langtidseffekten av ett fullskala grønt tak ble modellert som en Bioretention Cell LID. Konklusjonen var at denne modellen ga en god sammenheng mellom målt og simulert avrenning.

4.2 LID hydrologi

En Bioretention Cell LID kan beskrives ved flere ulike horisontale lag oppå hverandre, se figur 13.

- **Surface layer(overflate lag):** Overflate laget/vegetasjonen på det grønne taket får tilførsel av vann gjennom nedbør og avrenning fra omgivelsene. Hvis man ser på massebalansen, så må vannmengden som kommer inn også gå ut igjen. Vann forsvinner gjennom evaporasjon av vann som ligger i små depresjoner, infiltrasjon ned i jordlaget, intersepsjon i vegetasjonen, og alle typer avrenning på overflaten.
- **Soil layer(jordlag):** Jordlaget får tilførsel av vann gjennom infiltrasjon fra overflaten. Vannet går tapt gjennom evaporasjon og perkolasjon til det magasinerende lag under.
- **Storage layer(magasinerende lag):** Får tilførsel av vann gjennom perkolasjon fra jordlaget, og taper vann ut fra dreneringsutløpet.



Figur 13: Skjematisk fremstilling av en Bioretention Cell i SWMM (Rossmann & Huber, 2016b).

Når den hydrologiske effekten skal modelleres, må det antas at

1. Tversnittarealet holdes konstant gjennom hele dybden av systemet.
2. Strømning gjennom hele systemet er endimensjonal i vertikal retning.
3. Vann som strømmer inn i systemet er uniformt distribuert over hele overflaten.
4. Fuktighetsinnholdet er uniformt distribuert gjennom hele jordlaget.
5. Matriske krefter i det magasinerende laget er neglisjerte, slik at laget kun er ett magasin som fylles opp med vann fra bunn til topp.

Med disse antagelsene kan SWMM modellere en Bioretention Cell gjennom å løse ett sett med kontinuitetslikninger. Hver likning tilhører endringen i vannmengde i sitt respektive lag over tid, der forskjellen i vannfluksen mellom innstrømning og utstrømning i hvert lag beskrives som volum per enhetsareal per enhetstid.

Likningssettet skrives slik:

$$\Phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad \text{for ett overflatelag (1)}$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad \text{for ett jordlag (2)}$$

$$\Phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad \text{for ett magasinerende lag (3)}$$

hvor

d_1 = vanndybden lagret på overflaten. [L],

θ_2 = fuktighetsinnholdet i jordlaget (volum av vann / volum av jord),

d_3 = vanndybde i det magasinerende lag. [L],

i = nedbørintensitet som faller direkte på overflaten. [L/T],

q_0 = innstrømning rate til overflatelaget fra avrenning fra andre. [L/T],

q_1 = overflate avrenning eller overløpsrate. [L/T],

q_3 = utstrømningsrate fra dreneringsrør i magasinerende lag. [L/T],
 e_1 = evapotranspirasjon rate på overflaten. (ET). [L/T],
 e_2 = evapotranspirasjon rate i jordlaget. [L/T],
 e_3 = evapotranspirasjon rate i magasinerende lag. [L/T],
 f_1 = infiltrasjonsrate av overflatevann inn i jordlag. [L/T],
 f_2 = perkolasjonsrate av vann gjennom jordlaget inn i det magasinerende lag. [L/T],
 f_3 = eksfiltrasjonsrate av vann i det magasinerende lag ned i underliggende jord. [L/T],
 \emptyset_1 = forhold mellom hulrom og totalt volum i overflaten,
 \emptyset_2 = forhold mellom hulrom og totalt volum i jordlaget,
 \emptyset_3 = forhold mellom hulrom og totalt volum i det magasinerende lag,
 D_1 = høyde på oppstuvning av vann på overflaten. [L],
 D_2 = tykkelse på jordlaget. [L],
 D_3 = tykkelse på det magasinerende lag. [L].

Innstrømning på overflaten ($i + q_0$)

Overflatelaget får tilførsel av vann enten ved direkte nedbør (i) og/eller avrenning fra andre områder (q_0). I denne oppgaven er takene plassert slik at det ikke er noe vanntilførsel fra avrenning fra omkringende områder. Det er kun den direkte nedbøren som faller på takene som bidrar til innstrømningen.

Overflateinfiltrasjon (f_1)

Infiltrasjonen av overflatevann ned i jordlaget kan modelleres ved Green-Ampt likningen:

$$f_1 = K_{25} \left(1 + \frac{(\emptyset_2 - \theta_{20})(d_1 + \psi_2)}{F} \right) \quad (4)$$

hvor

f_1 = infiltrasjonsraten

K_{25} = jordas mettede hydrauliske konduktivitet

θ_{20} = fuktinnhold på toppen av jordlaget

ψ_2 = sugehøyde ved fuktighetsfronten som skapes i infiltrasjonen av jorda

F = kumulativt infiltrasjonsvolum per enhetsareal ved en nedbørshendelse

Green-Ampt likningen gjelder kun når mettede forhold er oppnådd på toppen av jordlaget. Før dette vil all innstrømning infiltreres.

Evapotranspirasjon (e)

Evapotranspirasjonen beregnes fra overflatelaget og nedover, hvor all ubrukt potensiell ET

blir tatt med i neste lags beregning.

Ved tiden t:

$$e_1 = \min \left[E_0(t), \frac{d_1}{\Delta t} \right] \quad (5)$$

$$e_2 = \min [E_0(t) - e_1, (\theta_2 - \theta_{WP})D_2/\Delta t] \quad (6)$$

$$e_3 = \begin{cases} \min [E_0(t) - e_1 - e_2, \phi_3 d_3/\Delta t], & \theta_2 < \phi_2 \\ 0, & \theta_2 \geq \phi_2 \end{cases} \quad (7)$$

hvor

$E_0(t)$ = den potensielle evapotranspirasjons rate for tiden t

Δt = tids steg for numerisk evaluering av kontinuitetslikningene (1)-(3)

θ_{WP} = verdi for Wilting point (visnegrense, den verdi der planter ikke lengre kan ta ut vann fra jorda)

Når θ_2 , altså fuktighetsinnholdet i jorda, når θ_{WP} (visnegrensen), vil det ikke være noe bidrag fra jordlaget til den totale ET.

Perkolasjon

Hastigheten på perkolasjon av vann gjennom ett substrat og ned i det magasinerende lag, kan modelleres ved hjelp av Darcy's lov

$$f_2 = \begin{cases} K_{25} \exp(-HCO(\phi_2 - \theta_2)), & \theta_2 > \theta_{FC} \\ 0, & \theta_2 \leq \theta_{FC} \end{cases} \quad (8)$$

hvor

HCO = Percolation decay constant – beskriver hvordan ledningsevnen avtar når fuktighetsinnholdet avtar

θ_{RC} = fuktighetsinnholdet ved maks feltkapasitet

Som likningssettet viser, vil perkolasjonen være lik 0 når fuktighetsinnholdet θ_2 går under feltkapasitetens fuktighetsinnhold.

Strømning i dreneringsrør

For å modellere utløpsstrømningen fra dreneringsrør i det magasinerende lag brukes likningen

$$q_3 = C_{3D}(h_3)^{\eta_{3D}} \quad (9)$$

hvor

h_3 = trykkhøyden over utløpet

C_{3D} = koeffisient for utløpet

η_{3D} = eksponent for utløpet

Trykkehøyden h_3 varierer med høyden av vannivået over utløpet.

$h_3 = 0$ når $d_3 \leq D_{3D}$

$h_3 = d_3 - D_{3D}$ når $D_{3D} < d_3 < D_3$

$h_3 = (D_3 - D_{3D}) + (\theta_2 - \theta_{FC}) / (\theta_2 - \theta_{FC}) D_2$ når $d_3 = D_3$ og $\theta_{FC} < \theta_2 < \theta_2$

$h_3 = (D_3 - D_{3D}) + D_2 + d_1$ når $d_3 = D_3$ og $\theta_2 = \theta_2$

hvor

D_{3D} = høyden av utløpet over bunn av det magasinerende lag

θ_{FC} = mediets feltkapasitet (maksimalt fuktinnhold når vann ikke drenerer fritt fra mediet)

Det er ikke noe utløpsstrømning fra dreneringsrøret før vannivået overstiger utløpets høyde over bunn av laget. (Rossman & Huber, 2016a; Rossman & Huber, 2016b).

5. Modelleoppsett i SWMM 5.1

5.1 Oppbygning

Det ble brukt en egen konverteringsfil i Excel til å omgjøre rådata for nedbør og avrenning til DAT-format. Formatet på DAT-filene er Formatted text (space delimited). For at SWMM skal tolke DAT-filene må innholdet være organisert på en spesiell måte. Nedbørsfiler må inneholde stasjonsnavn, år, måned, dag, time, minutt og volum. For avrenning kreves navn på taket, dato(måned/dag/år), tidspunkt(time:minutt) og avrenning(l/s). Når filene er ferdig formatert kan de legges inn i SWMM programvaren.

Nedbør og avrenning

Først ble det opprettet en Rain Gage i SWMM, som skal representere nedbøren som faller på nedbørsfeltene. Oppsettet av Rain Gage objektet vises i tabell 3. DAT-filen for nedbør ble lagt inn under File Name i Data File. I Time Interval ble det valgt 1 minutters tidsoppløsning. Etter at nedbørsfilen ble kjørt i SWMM første gang oppstod det en tidsforskyvning i verdiene. Dette ble løst ved å knytte hvert datapunkt for nedbør i konverteringsfilen til tidspunktet for foregående datapunkt. For å få simuleringen til å stemme måtte Recording Interval settes til 15 minutter for perioden 04.09 kl. 19 og 1 minutt fom. 04.09 kl 19:15. Avrenningsfilen ble lagt inn i Calibration Data under Project fanen i SWMM, som vises i tabell 4. Det eneste som ble endret i denne filen i forhold til rådata var fluktuasjoner, slik at negative avrenningsverdier ble fjernet.

Tabell 3: Oppsett av Rain Gage i SWMM.

Property	Value
Name	RG
X-Coordinate	3463.902
Y-Coordinate	8863.287
Description	
Tag	
Rain Format	VOLUME
Time Interval	0:01
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	FILE
TIME SERIES:	
- Series Name	*
DATA FILE:	
- File Name	C:\Users\Eivin\OneDrive\
- Station ID	NMBU
- Rain Units	MM

X coordinate of rain gage on study area map

Tabell 4: Avrenningsfil lagt inn i Calibration Data i SWMM.

Calibration Variable	Name of Calibration File
Subcatchment Runoff	C:\Users\Eivin\OneDrive\Dokumenter\Masteroppgave grønne tak H2018\E
Subcatchment Washoff	
Node Water Depth	
Link Flow Rate	
Node Water Quality	
Node Lateral Inflow	
Node Flooding	
Groundwater Flow	
Groundwater Elevation	
Snow Pack Depth	
Link Flow Depth	
Link Flow Velocity	

Browse Edit OK Cancel Help

Nedbørsfelt

Rain Gage objektet kobles til tre like nedbørsfelt(subcatchments). Hvert nedbørsfelt representerer ett tak. Det svarte referansetaket modelleres som ett vanlig nedbørsfelt med 100 % tette flater, mens de to grønne takene har en Bioretention Cell LID enhet som dekker hele nedbørsfeltet. Tabell 5, 6 og 7 viser oppsettet av nedbørsfeltene. Når et nedbørsfelt er 100 % dekket av en LID enhet styres alle egenskapene til taket i SWMMs LID Control Editor.

Tabell 5: Oppsett av GT1 i SWMM.

Tabell 6: Oppsett av REF i SWMM.

Tabell 7: Oppsett av tak 3 i SWMM.

Subcatchment tak1		Subcatchment tak2		Subcatchment tak3	
Property	Value	Property	Value	Property	Value
Name	tak1	Name	tak2	Name	tak3
X-Coordinate	2450.077	X-Coordinate	3402.458	X-Coordinate	4385.560
Y-Coordinate	8125.960	Y-Coordinate	8110.599	Y-Coordinate	8110.599
Description		Description		Description	
Tag		Tag		Tag	
Rain Gage	RG	Rain Gage	RG	Rain Gage	RG
Outlet	utløp1	Outlet	utløp2	Outlet	utløp3
Area	0.005	Area	0.005	Area	0.005
Width	5	Width	5	Width	5
% Slope	0.5	% Slope	2.5	% Slope	0.5
% Imperv	100	% Imperv	100	% Imperv	100
N-Imperv	0.016	N-Imperv	0.016	N-Imperv	0.016
N-Perv	0.1	N-Perv	0.1	N-Perv	0.1
Dstore-Imperv	0	Dstore-Imperv	0	Dstore-Imperv	0
Dstore-Perv	0	Dstore-Perv	0	Dstore-Perv	0
%Zero-Imperv	100	%Zero-Imperv	100	%Zero-Imperv	100
Subarea Routing	OUTLET	Subarea Routing	OUTLET	Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100	Percent Routed	100	Percent Routed	100
Infiltration Data	HORTON	Infiltration Data	HORTON	Infiltration Data	HORTON
Groundwater	NO	Groundwater	NO	Groundwater	NO
Snow Pack		Snow Pack		Snow Pack	
LID Controls	1	LID Controls	0	LID Controls	1
Land Uses	0	Land Uses	0	Land Uses	0
Initial Buildup	NONE	Initial Buildup	NONE	Initial Buildup	NONE
Curb Length	0	Curb Length	0	Curb Length	0
N-Perv Pattern		N-Perv Pattern		N-Perv Pattern	
Dstore Pattern		Dstore Pattern		Dstore Pattern	
Infil. Pattern		Infil. Pattern		Infil. Pattern	
Depth of depression storage on impervious area (mm)		Depth of depression storage on impervious area (mm)		Depth of depression storage on impervious area (mm)	

LID Control Editor

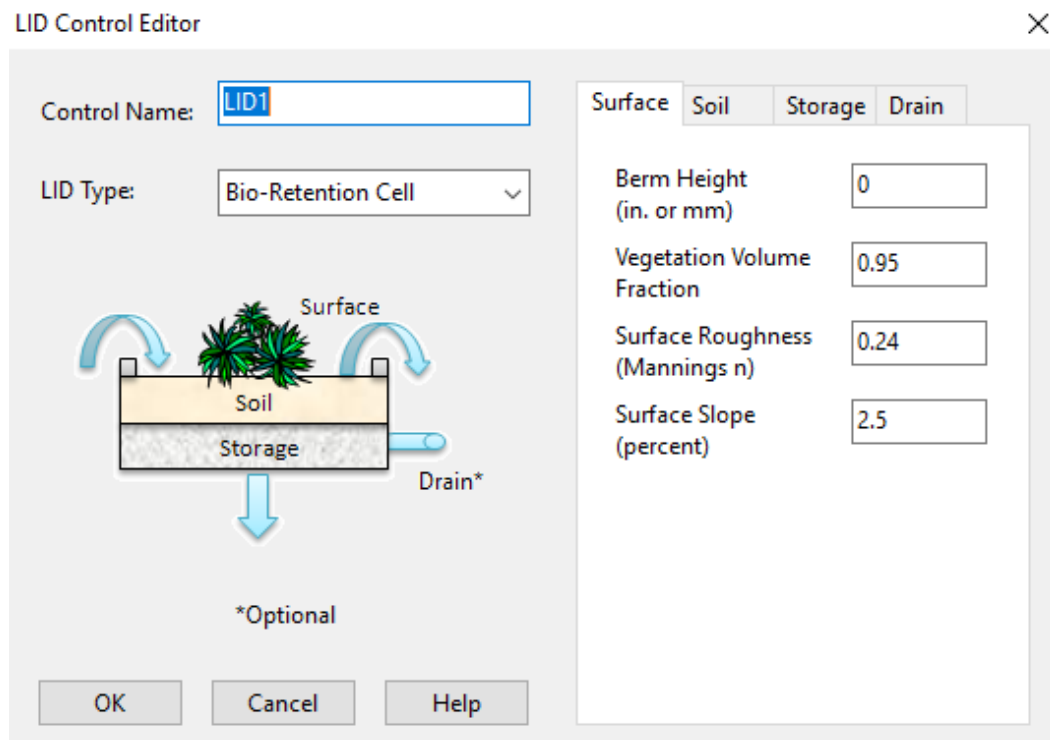
En LID Control Editor brukes til å definere og redigere LID enheter i SWMM. Enhetene blir designet slik at de kan plasseres i et hvilket som helst antall nedbørsfelt, i forskjellige størrelser eller replikaer. Tabell 8 viser oppsettet av en Bioretention Cell LID.

Control name: Ett egendefinert navn som identifiserer en LID enhet.

LID Type: Hvilken type LID enhet som skal brukes (Bioretention Cell, Rain Garden, Green Roof, Infiltration Trench, Permeable Pavement, Rain Barrel eller Vegetative Swale).

Process layers: Egendefinerte inputverdier for ulike parametere i hvert lag av LID enheten. Hver LID har forskjellige parametere og lag.

Tabell 8: Oppsett av en Bioretention Cell i LID Control Editor i SWMM.



Parametere

En forklaring av alle parameterne i en Bioretention Cell LID enhet er gitt i tabell 9.

Tabell 9: Forklaring av parameterne i en Bioretention Cell LID i SWMM.

<i>Parameter</i>	<i>Forklaring</i>	<i>Enhet</i>
<i>Surface</i>		
Berm height	Maksimale dybden som vann kan samles på overflaten før det går i overløp	mm
Vegetation volume fraction	Del av overflatens lagringsvolum som er okkupert av vegetasjon (stilker og blader)	-
Surface roughness	Manningstall for avrenning på overflaten	-
Surface slope	Overflatens helning	%
<i>Soil</i>		
Thickness	Tykkelsen på mediet(substratet)	mm
Porosity	Forhold mellom porevannsvolum og mediets totale volum.	-
Field Capacity	Forhold mellom porevannsvolum og totalt volum etter at mediet har drenert fullstendig	-
Wilting point	Minste fuktighetsinnhold i mediet som vegetasjonen trenger før det visner	-

Conductivity	Mettet hydraulisk ledningsevne	mm/h
Conductivity slope	Hvor fort ledningsevnen til mediet avtar når fuktighetsinnholdet avtar	-
Suction head	Gjennomsnittsverdien for mediets kapillære sugekraft langs fuktighetsfronten	mm
<i>Storage layer</i>		
Thickness	Tykkelsen på det magasinerende lag	mm
Void ratio	Forhold mellom volum av tomrom og faststoff i laget	-
Seepage rate	Hvor fort vann siver inn i jorda under laget	mm/hr
Clogging factor	Totalt volum av rensed avrenning som trengs for å tette hele bunnen, delt på volum av tomrom i laget	-
<i>Drain</i>		
Flow coefficient	Dreneringskoeffisient. Settes lik 0 hvis det ikke er noe dreneringsrør i laget	-
Flow exponent	DreneringsekspONENT	-
Offset	Høyden til utløpet over bunnen av laget	mm
Open level	Høyden på vannivået som trengs for å automatisk åpne utløpet	mm
Closed level	Høyden på vannivået som trengs for å automatisk stenge utløpet	mm
Control curve	Navn på kontrollkurven som justerer den kalkulerede utløpsstrømmingen som en funksjon av høyden på vannivået over utløpet.	

LID Usage Editor

En LID Usage Editor brukes til å bestemme egenskaper ved LID enhetene. Tabell 10 viser oppsettet av en LID Usage Editor i SWMM.

Control Name: Navn på LID enheten som skal brukes.

LID Occupies Full Subcatchment: Krysses av hvis hele nedbørsfeltet skal dekket av en LID enhet.

Area of Each Unit: Hvor stort areal hver enhet dekker.

Number of Units: Hvor mange replikaer av en LID enhet som skal plasseres i nedbørsfeltet.

Surface Width per Unit: Bredden på overflaten av enheten.

% Initially Saturated: Hvor vannmettet mediet er før simulering(initialverdi). 0 % tilsvarer fuktighetsinnhold ved visnepunktet, mens 100 % tilsvarer fuktighetsinnhold lik porøsiteten av mediet. Det magasinerende laget under mediet antas å være helt tørt. Dette gjelder for Bioretention Cell, Green Roof og Rain Garden.

% of Impervious Area Treated: Hvor stor prosentandel av det tette arealet av nedbørsfeltet som ikke er LID, som gir avrenning til LID enheten. Hvis LID enheten dekker hele nedbørsfeltet blir dette inputfeltet ignorert.

% of Pervious Area Treated: Hvor stor prosentandel av det gjennomtrengelige arealet av nedbørsfeltet som ikke er LID, som gir avrenning til LID enheten. Hvis LID enheten dekker

hele nedbørsfeltet blir dette inputfeltet ignorert.

Send Drain Flow To: Navn på node eller nedbørsfelt som får tilført dreneringsavløp fra LID enheten.

Return all Outflow to Pervious Area: Krysses av hvis avløp fra LID enheten skal føres tilbake til nedbørsfeltets gjennomtrengelige areal.

Tabell 10: Oppsett av LID Usage Editor in SWMM.

LID Usage Editor

LID Control Name: LID1

LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m): 50.00

Number of Units: 1

% of Subcatchment Occupied: 100.0

Surface Width per Unit (ft or m): 5

% Initially Saturated: 0

% of Impervious Area Treated: 0

% of Pervious Area Treated: 0

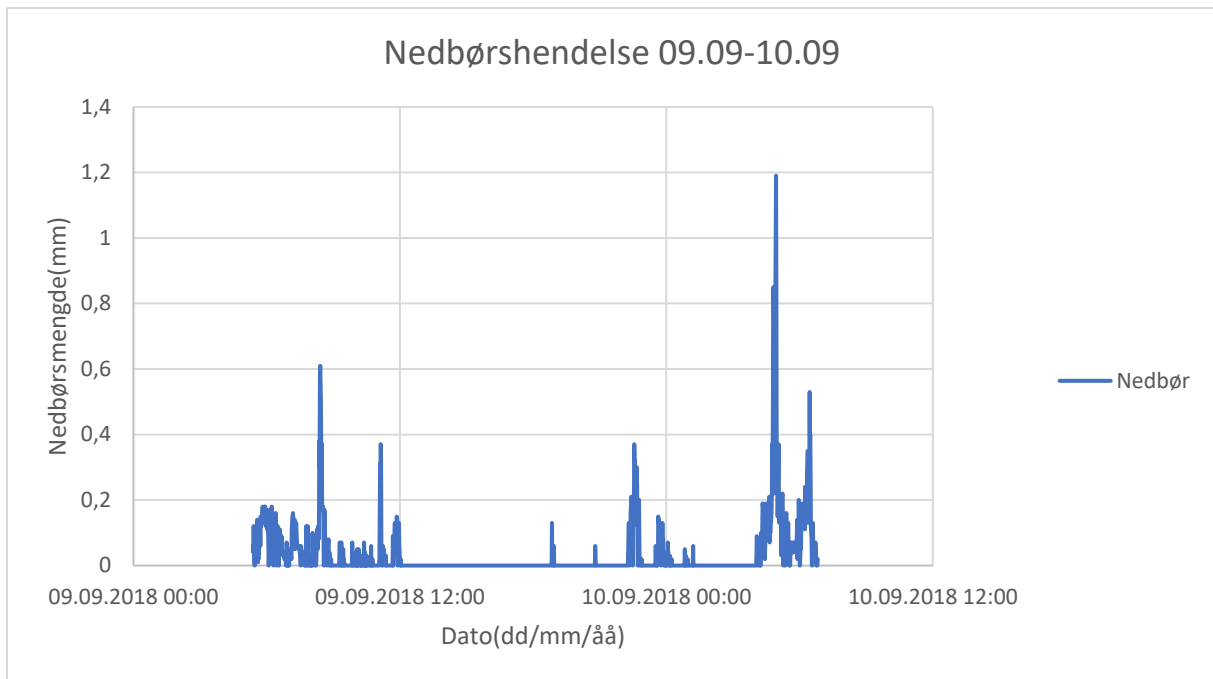
Send Drain Flow To:
(Leave blank to use subcatchment outlet)

Return all Outflow to Pervious Area

OK Cancel Help

5.4 Kalibrering

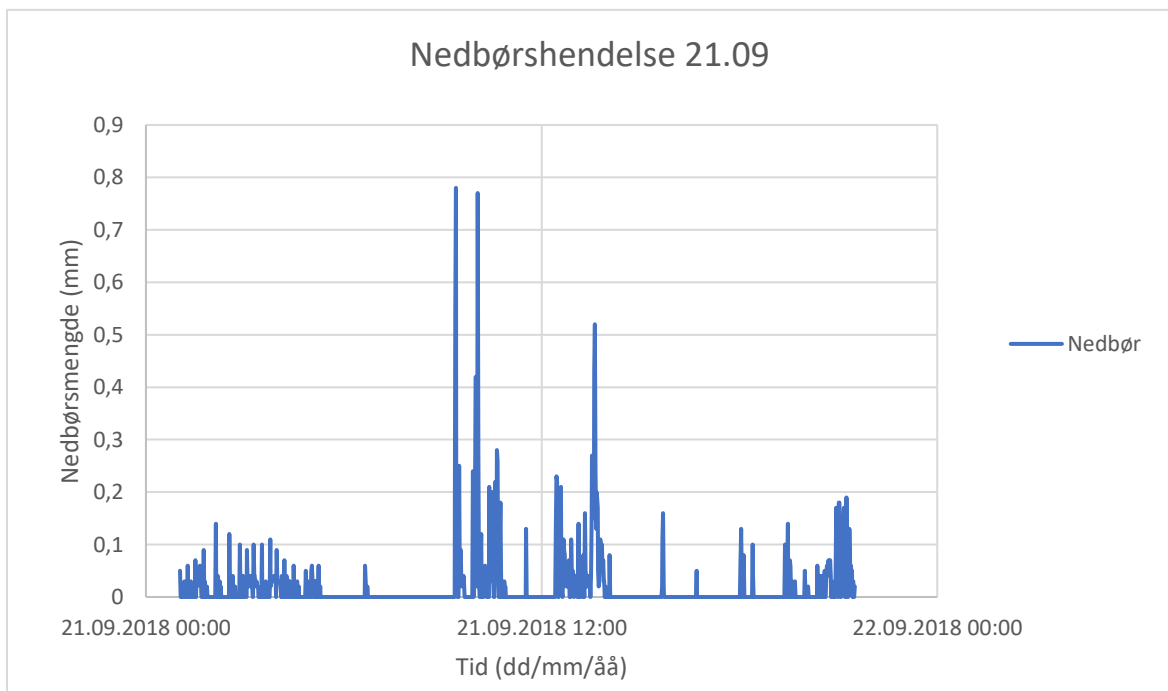
Etter at modellen var ferdig oppsatt i SWMM ble det valgt en nedbørshendelse til kalibrering. Det ble bestemt å bruke den kraftigste nedbørshendelsen i perioden for kalibrering av modellen (figur 14). Her menes en hendelse der det kontinuerlig registreres nedbør uten lengre perioder med null nedbør. Fra 09.09 kl. 05:23 til 10.09 kl. 06:49 ble det registrert 53,73 mm nedbør. Nedbørshendelsen vises i figur 14. Den lengste perioden med null nedbør i denne hendelsen var fra 12.03-18.49 den 09.09, altså 6,46 timer. Det må også påpekes at det var en separat hendelse like før denne hendelsen, med kraftig nedbør, fra 08.09 kl. 03:03 til 07:37 (12,55 mm nedbør på 4.34 timer). Det var 21,46 timers mellomrom mellom disse to hendelsene.



Figur 14: Den mest nedbørsrike enkelthendelsen i måleperioden 09.09-10.09.

Nedbørshendelse for etterprøving

Til etterprøving ble det valgt en helt tilfeldig nedbørshendelse. Denne hendelsen vises i figur 15. I perioden 01:02-21:30 den 21.09 falt det totalt 23,45 mm nedbør. Det var ikke registrert noen nedbør like før denne hendelsen.



Figur 15: Nedbørshendelsen til etterprøving, 21.09.

Dimensjonerende nedbørshendelse

Modellen ble testet ved en dimensjonerende nedbørshendelse med stort gjentakintervall og en bestemt klimafaktor. Det ble valgt å bruke en hendelse lik (Øyre & Trommald, 2018) med 20 års gjentakintervall, 1 times varighet, 10 minutters tidsoppløsning og en klimafaktor på 1.4. Nedbørsintensitetsverdier hentes fra IVF-kurve for Ås – Rustadskogen (Norsk Klimaservicesenter, 2018). Figur 16 viser den dimensjonerte nedbørshendelsen (symmetrisk regnhyetogram). Nedenfor vises oppsett av regnhyetogrammet.

$$I_{10} = \frac{15,2 \text{ mm}}{10 \text{ min}} * 1,4 = 2,128 \text{ mm/min} \quad (10)$$

$$I_{20} - I_{10} = \frac{19,9 \text{ mm} - 15,2 \text{ mm}}{10 \text{ min}} * 1,4 = 0,658 \text{ mm/min} \quad (11)$$

$$I_{30} - I_{20} = \frac{22,6 - 19,9 \text{ mm}}{10 \text{ min}} * 1,4 = 0,378 \text{ mm/min} \quad (12)$$

$$I_{40} - I_{30} = \frac{25 \text{ mm} - 22,6 \text{ mm}}{10 \text{ min}} * 1,4 = 0,336 \text{ mm/min} \quad (13)$$

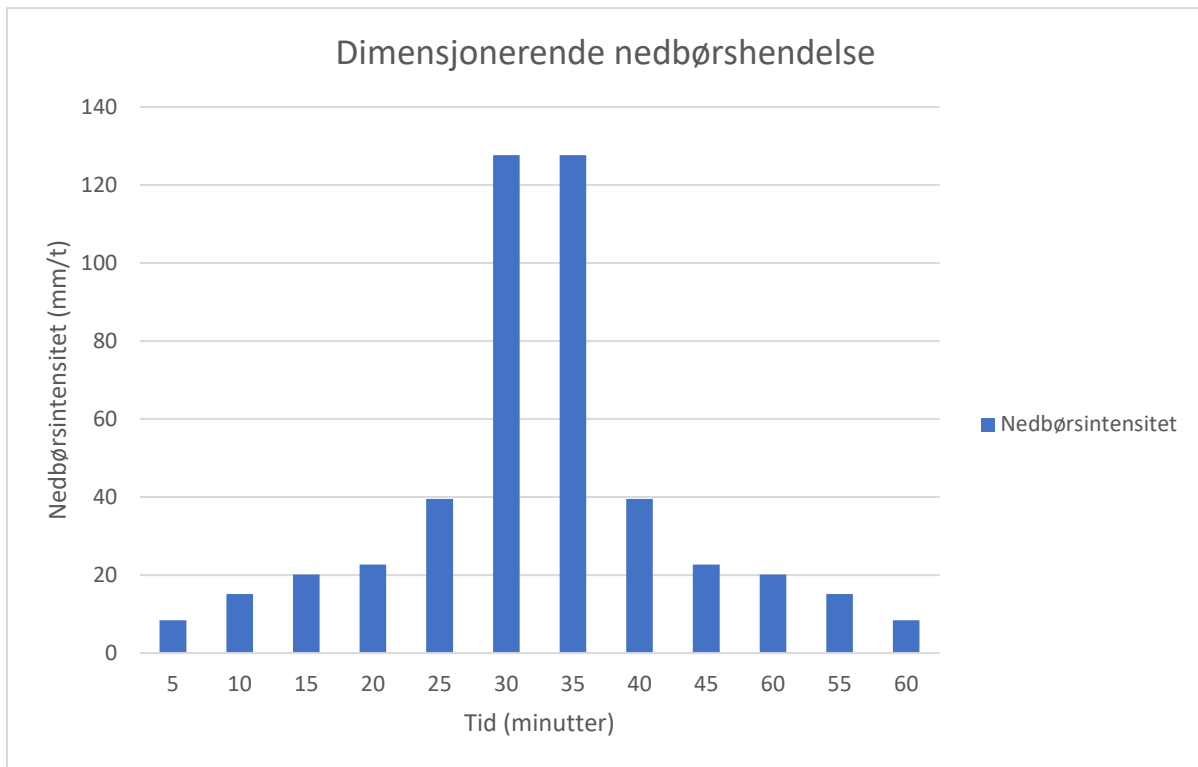
$$I_{50} - I_{40} = \frac{26,8 \text{ mm} - 25 \text{ mm}}{10 \text{ min}} * 1,4 = 0,252 \text{ mm/min} \quad (14)$$

$$I_{60} - I_{50} = \frac{27,8 \text{ mm} - 26,8 \text{ mm}}{10 \text{ min}} * 1,4 = 0,14 \text{ mm/min} \quad (15)$$

Tabell 11 viser hvordan nedbørintensiteten endrer seg over tidsforløpet (60 min). I SWMM brukes formatet mm:time, derfor må intensitetene gjøres om fra mm/min til mm/time.

Tabell 11: Oppsett av ett symmetrisk regnhyetogram

Tidsforløp (minutter)	Regnintensitet (mm/t)
0-5	8,4
5-10	15,12
10-15	20,16
15-20	22,68
20-25	39,48
25-30	127,68
30-35	127,68
35-40	39,48
40-45	22,68
45-50	20,16
50-55	15,12
55-60	8,4



Figur 16: Dimensjonerende nedbørshendelse. Varighet 60 min. Gjentakintervall 20 år. Klimafaktor 1,4.

Kvalitet på modellen

Nash-Sutcliffe Model Efficiency coefficient(NSME) ble brukt til å vurdere hvor gode modellen er til å predikere avrenning fra de grønne takene. En NSME verdi > 0.5 regnes som akseptabel predikasjon, mens NSME < 0.5 regnes som lite tilfredsstillende predikasjon. Jo nærmere NSME = 1, jo bedre er predikasjonen (Stovin & Peng, 2017).

$$NSME = 1 - \left[\frac{\sum_1^N (Q_m - Q_p)^2}{\sum_1^N (Q_m - Q_{Am})^2} \right] \quad (16)$$

hvor

N = antall målinger

Q_m = avrenning målt

Q_p = avrenning modellert

Q_{Am} = gjennomsnittlig målt avrenning

Følsomhetsanalyse

En enkel følsomhetsanalyse ble brukt for å finne ut hvilke parametere som hadde størst innflytelse på modellen. For å redusere avviket mellom målte og modellerte verdier ble det utført følsomhetsanalyse for maksimal avrenning. Ulike parametere ble justert over ett intervall på +/- 50 %. Hver parameter ble justert individuelt, mens de andre ble holdt

konstante. Formelen som ble brukt til analysen vises nedenfor (Rosa, Clausen, & Dietz, 2015).

$$\text{Sensitivity} = \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) \left(\frac{R}{P}\right) \quad (17)$$

hvor

∂R = endring i modellert verdi

∂P = endring i parameter verdi

R = original modellert verdi

P = original parameter verdi

5.2 Primærmodell

I tabell 12 vises en fullstendig liste over parametere som ble valgt i primærmodellen. Noen av parameterne er fastsatte og kan ikke endres. Dette er bla. overløpshøyde, takhelning, og tykkelse på substrat og LECA laget. Disse ble hentet fra (Øyre & Trommald, 2018). De parameterne som var ukjente ble enten antatt eller hentet fra SWMMs hjelpeverktøy og ulike studier publisert på nett. Det ble brukt verdier fra studier der takene hadde noenlunde lik oppbygning som takene ved Bia. Det ble ikke funnet noen publiserte studier med LECA under de grønne takene. Det er mange av parameterne som er veldig kompliserte å beregne og som ikke er oppgitt av produsent, bla. porøsitet, feltkapasitet, ledningsevne, osv. Derfor er det veldig vanskelig å få en primærmodell til å stemme med virkeligheten.

Tabell 12: Parameterverdier for primærmodellen i SWMM.

<i>Parameter</i>	<i>Verdi</i>	<i>Kilde</i>	<i>Enhet</i>
Surface			
Berm height	0	(Øyre & Trommald, 2018)	mm
Vegetation volume fraction	0,1	EPA SWMM Help	-
Surface roughness	0,24	EPA SWMM Help	-
Surface slope	2.5	(Øyre & Trommald, 2018)	%
Soil			
Thickness	40	(Øyre & Trommald, 2018)	mm
Porosity	0,7	(Bengtsson, 2005)	-
Field capacity	0,45	(Bengtsson, 2005)	-
Wilting point	0,15	(Bengtsson, 2005)	-

Conductivity	1000	(Stovin & Peng, 2017)	mm/h
Conductivity slope	40	(Palla & Gnecco, 2015)	-
Suction head	110	(Rosa, Clausen, & Dietz, 2015)	mm
Storage layer			
Thickness	150	(Øyre & Trommald, 2018)	mm
Void ratio	0.75	EPA SWMM Help	-
Seepage rate	0	EPA SWMM Help	mm/hr
Clogging factor	0	EPA SWMM Help	-
Drain			
Flow coefficient	0.1584	Antatt	-
Flow exponent	1	Antatt	-
Offset	0	Antatt	mm

5.3 Sekundærmodell

Primærmodellen ble til sekundærmodell ved å justere på parameterne for å få modellen til å passe bedre med observerte verdier. Dette ble gjort gjennom en «prøv og feil» prosedyre, der hver enkelt parameter ble justert for å få best mulig match. Full liste over parametere vises i tabell 13.

Tabell 13: Parameterverdier for sekundærmodellen i SWMM.

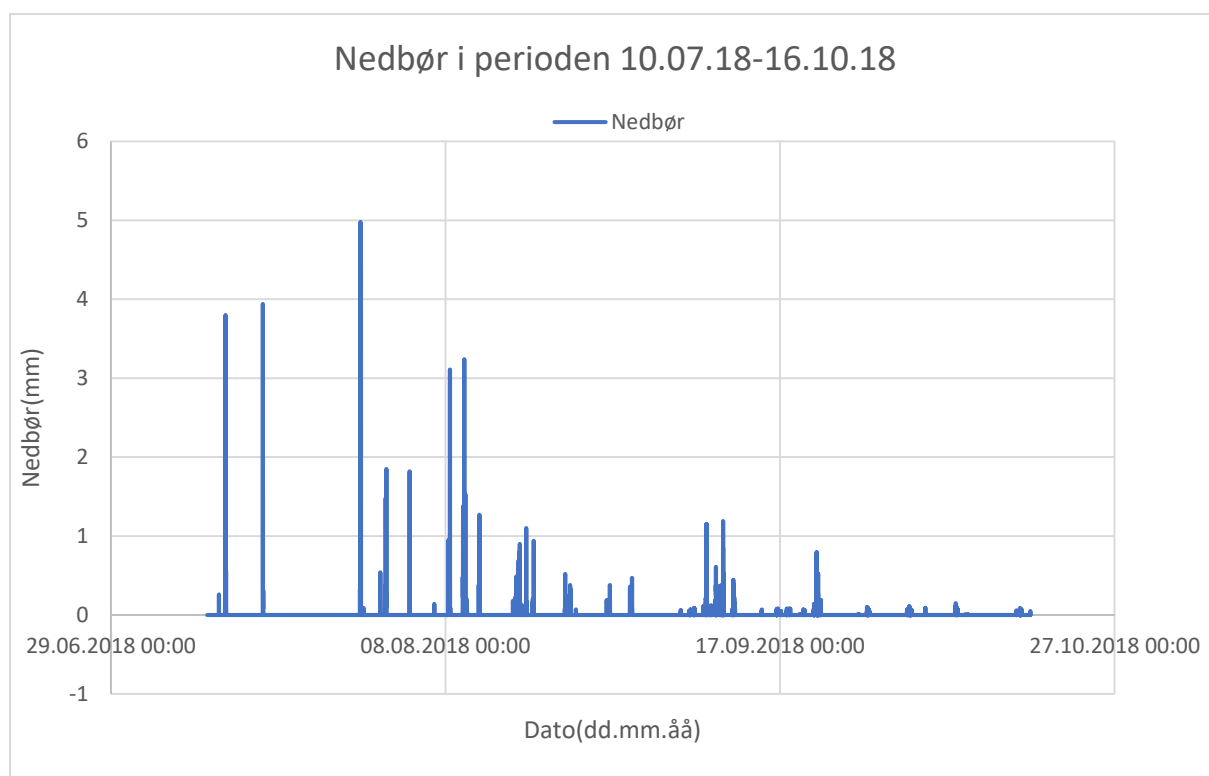
<i>Parameter</i>	<i>Verdi</i>	<i>Enhet</i>
Surface		
Berm height	0	mm
Vegetation volume fraction	0,1	-
Surface roughness	0,24	-
Surface slope	2.5	%
Soil		
Thickness	40	mm
Porosity	0,6	-

Field capacity	0,35	-
Wilting point	0,25	-
Conductivity	1000	mm/h
Conductivity slope	20	-
Suction head	110	mm
Storage layer		
Thickness	150	mm
Void ratio	0.9	-
Seepage rate	0	mm/hr
Clogging factor	0	-
Drain		
Flow coefficient	0.004	-
Flow exponent	1.5	-
Offset	0	mm

6. Resultater

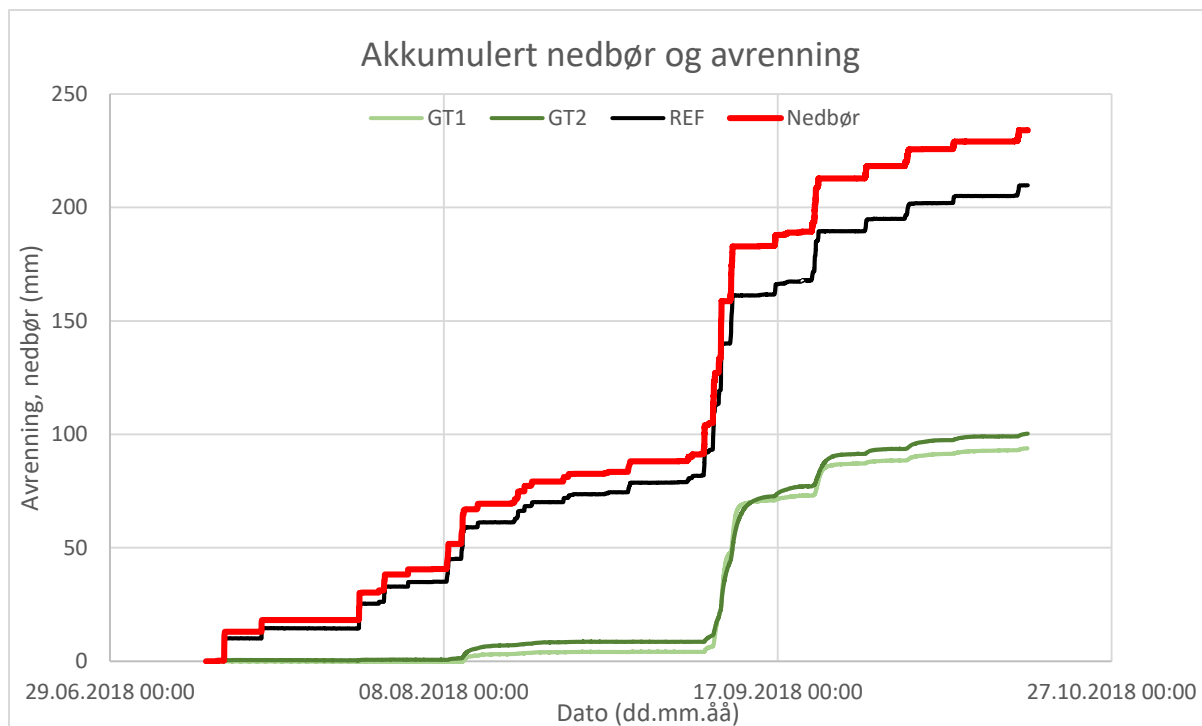
6.1 Måledata fra Bia

Nedenfor vises resultater for referansetaket og de to grønne takene i perioden 10.07.18 til 16.10.18. Figur 17 viser nedbør som falt i perioden. Det ble registrert totalt 234,04 mm akkumulert nedbør. Det er kun to hele måneder med registrerte målinger. I juli måned f.o.m. 10.07.18 kl. 12.15 ble det registrert 38,25 mm nedbør. August hadde totalt 49,87 mm nedbør. Måneden med størst mengde nedbør var september, med 130,1 mm. Oktober t.o.m. 16.10.18 kl. 23.06 falt det 15,82 mm nedbør. Største registrerte nedbørmåling var 4,98 mm den 28.07.18 kl. 20:00-20:15. Målingene for august og september stemmer bra med målingene fra nærmeste nærliggende målestasjon i Ås (NMBU). Her ble det målt 55,4 mm for august og 128,8 mm for september. Det gir en forskjell på kun 5,53 mm og 1,3 mm (Yr, 2018).



Figur 17: Nedbør som falt i perioden 10.07.18-16.10.18.

I figur 18 er nedbør- og avrenningsmålinger fra målestasjonen plottet for hele måleperioden. Totalt akkumulert avrenning fra referansetaket (REF) i måleperioden var 209,73 mm. For grønt tak 1 (GT1) og grønt tak 2 (GT2) henholdsvis 93,86 mm og 100,30 mm. GT1 ga en reduksjon på 115,87 mm, som er en prosentreduksjon på 55,25 % i forhold til referansetaket. GT2 ga en reduksjon på 109,42 mm (52,17 %). Tabell 14 gir en oversikt over akkumulert nedbør og avrenning, samt maksimale nedbør- og avrenningsmålinger for hver måned og totalt for hele perioden.

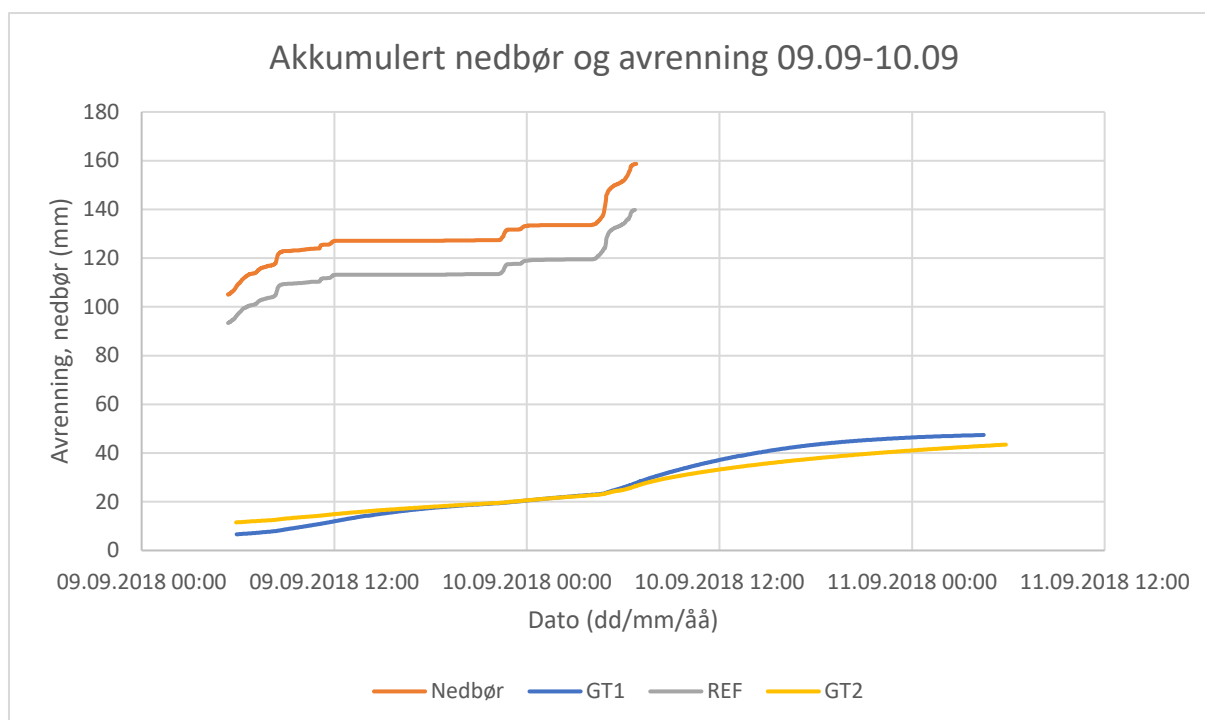


Figur 18: Akkumulert nedbør og avrenning fra de tre takene i perioden 10.07.18-16.10.18.

Tabell 14: Maks(mm/t) og akkumulert(mm) nedbør og avrenning for hver måned og for hele perioden.

Måned	Nedbør		GT1		REF		GT2	
	Maks	Akk	Maks	Akk	Maks	Akk	Maks	Akk
Juli	19,92	38,25	0,17	0,02	35,4	32,75	0,056	0,70
August	12,96	49,87	2,4	4,22	27,96	45,97	1,62	7,96
September	71,4	130,1	3,6	84,28	52,08	116,22	2,52	84,94
Oktober	9,0	15,82	1,2	5,34	3,36	14,78	2,88	6,70
Sum		234,04		93,86		209,73		100,30

Figur 19 viser akkumulert nedbør og akkumulert avrenning fra takene ved en nedbørsrik hendelse fra 09.09 kl. 05:23 til 10.09 kl. 06:49. Total nedbør var 53,73 mm. Total avrenning var 46,6 mm for REF, 40,78 mm for GT1 og 32 mm for GT2. Maks avrenning var 52,1 mm/t for REF, 3,6 mm/t for GT1 og 2,52 mm/t for GT2. Dette ga en prosentreduksjon i total avrenning på 12,49 % for GT1 og 31,33 % for GT2, og maksimal avrenning på 93,09 % for GT1 og 95,16 % for GT2. Avrenningstopp ble målt etter 23,55 timer for REF, 25,33 timer for GT1 og 25,4 timer for GT2. Dette ga en utsettelse av avrenningstopp på 2,45 timer for GT1 og 2,62 timer for GT2. Start på avrenning ble utsatt med 30 min for GT1 og 32 min for GT2. Tabell 15 gir en oversikt over maks avrenning, akkumulert/total avrenning, tidspunkt for avrenningsstart og tidspunkt for maks avrenning.

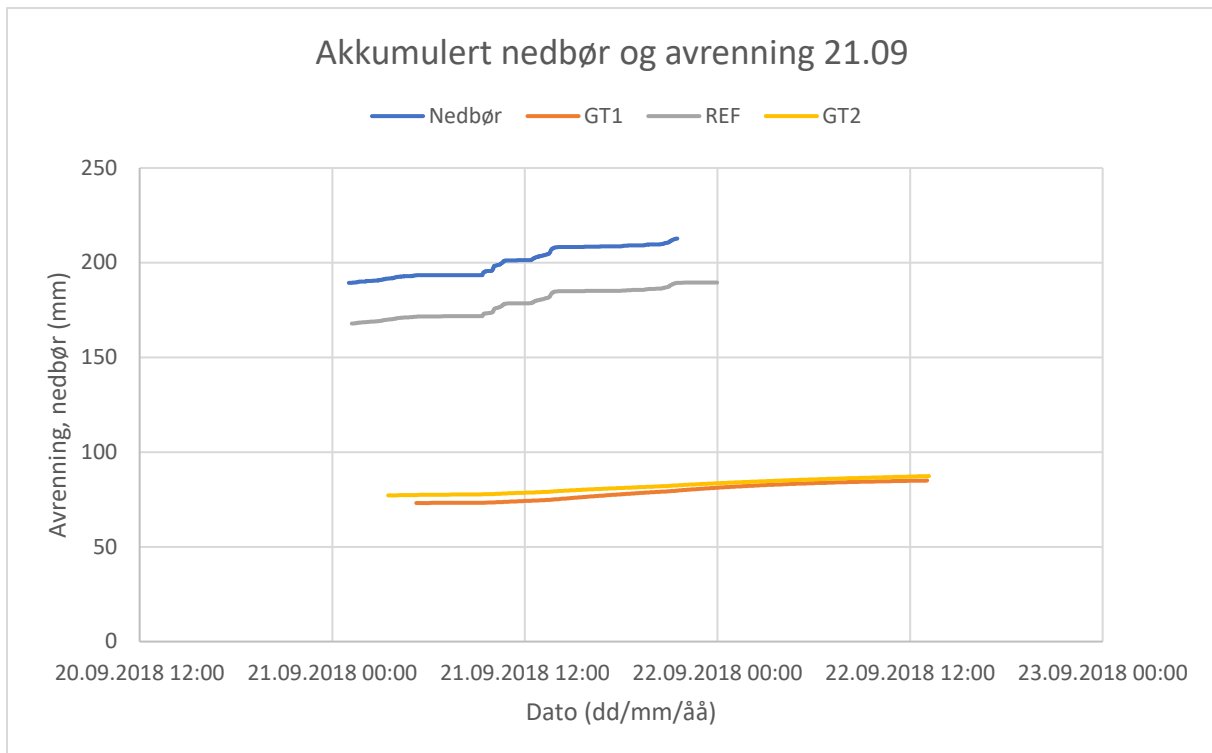


Figur 19: Akkumulert nedbør og avrenning i perioden 09.09-10.09.

Tabell 15: Maks avrenning (mm/t), akkumulert/total avrenning (mm), tidspunkt for avrenningsstart og tidspunkt for maks avrenning i perioden 09.09-10.09.

	Maks	Akk	Start	Start maks
Nedbør	71,39	53,73	05:23 (09.09)	04:56 (10.09)
GT1	3,6	40,78	05:55	06:43
REF	52,1	46,6	05:23	04:56
GT2	2,52	32	05:53	06:47

Figur 20 viser akkumulert nedbør og akkumulert avrenning fra takene ved en nedbørsrik hendelse den 21.09 kl. 01:02-21:30. Total nedbør var 23,4 mm. Total avrenning var 21,64 mm for REF, 11,9 mm for GT1 og 10,16 mm for GT2. Maks avrenning var 26,88 mm/t for REF, 1,8 mm/t for GT1 og 2,34 mm/t for GT2. Dette ga en prosentreduksjon i total avrenning på 45,01 % for GT1 og 53,05 % for GT2, og maksimal avrenning på 93,3 % for GT1 og 91,29 % for GT2. Avrenningstopp ble utsatt med 6,87 timer for GT1 og 6,45 timer for GT2. Tid før avrenningsstart ble utsatt med ca. 4,2 timer for GT1 og 2,45 timer for GT2. Tabell 16 gir en oversikt over maks avrenning, akkumulert/total avrenning, tidspunkt for avrenningsstart og tidspunkt for maks avrenning.



Figur 20: Akkumulert nedbør og avrenning for hendelsen 21.09.

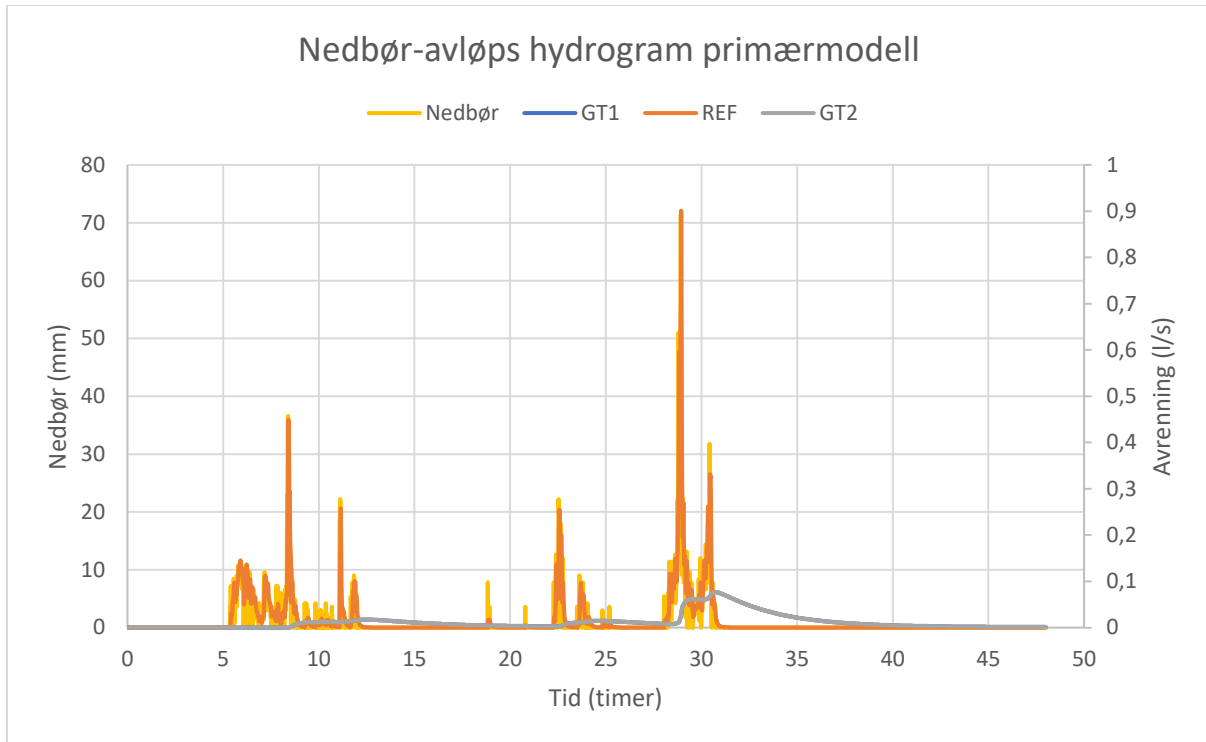
Tabell 16: Maks avrenning (mm/t), akkumulert/total avrenning (mm), tidspunkt for avrenningsstart og tidspunkt for maks avrenning for hendelsen 21.09

	Maks	Akk	Start	Start maks
Nedbør	46,8	23,4	01:02	10:04
GT1	1,8	11,9	05:14	16:56
REF	26,88	21,64	01:02	10:04
GT2	2,34	10,16	03:29	16:31

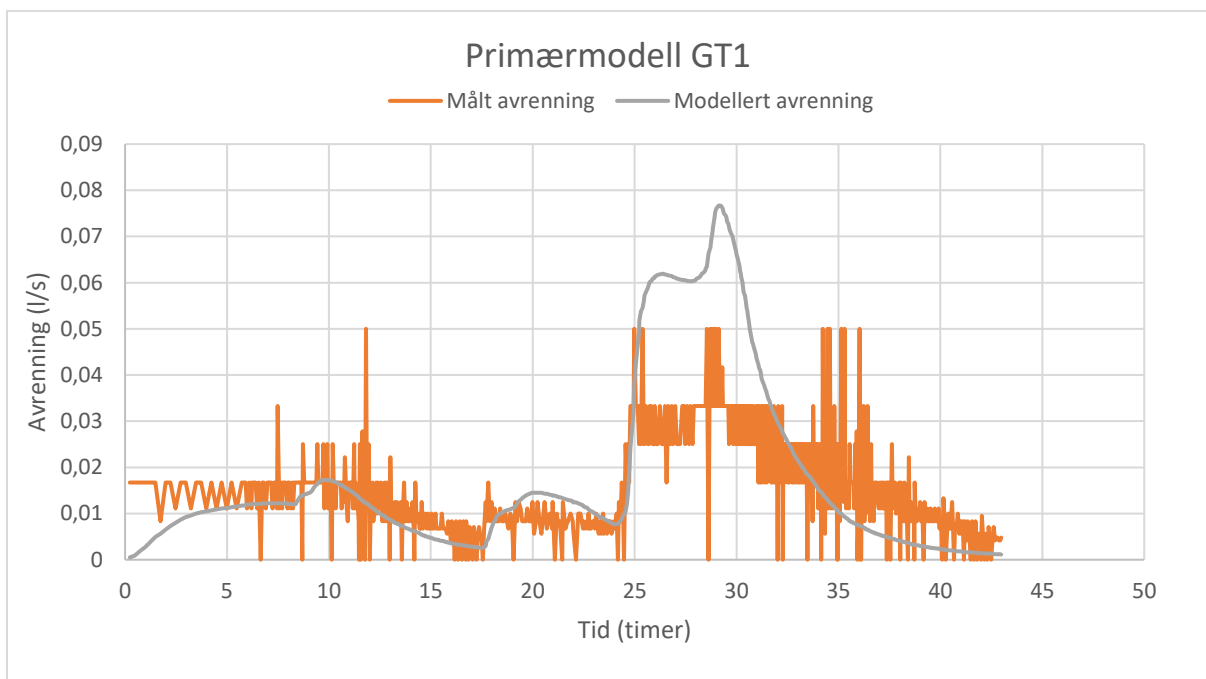
6.2 Primærmodell

Figur 21 viser avrenning fra takene plottet mot hverandre og nedbørshendelsen. Total avrenning fra REF var 53,86 mm og 41,28 mm for de grønne takene. Dette ga en reduksjon i avrenningsmengde på 23,36 %. Maks avrenning var 0,9 l/s for REF og 0,08 for de grønne takene, som ga en reduksjon på 91,11 %. Avrenningstoppene oppsto 28,92 timer etter simuleringstart for REF og 30,7 timer for de grønne takene. Dette ga en utsettelsestid på 1,78 timer.

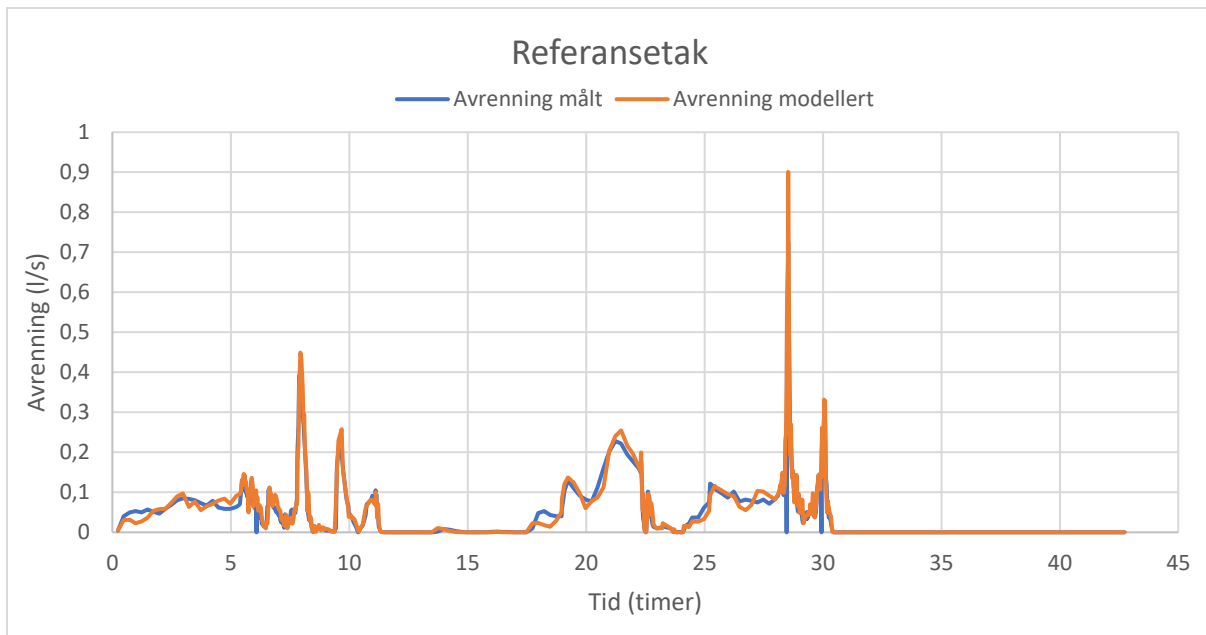
Figur 22, 23 og 24 viser primærmodellens simulerte verdier opp mot observerte verdier fra de tre takene. NSME verdier for takene var -0,97 for GT1, 0,91 for REF og -5,04 for GT2. Tabell 17 viser en oversikt over total avrenning, maks avrenning og NSME verdier for takene.



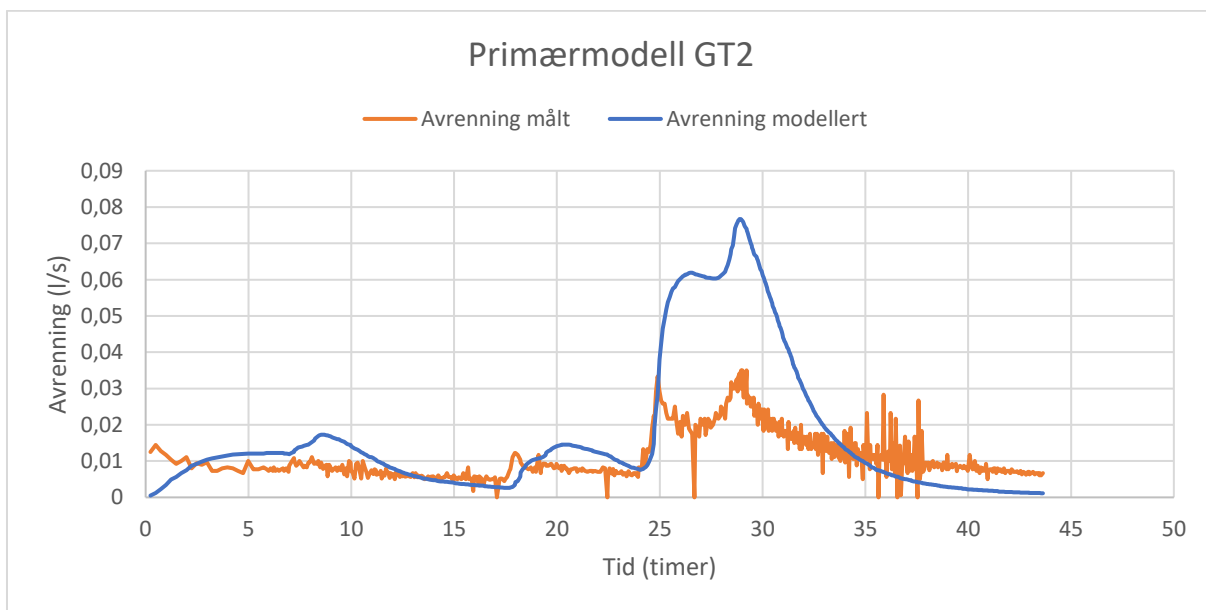
Figur 21: Hydrogram for primærmodellen.



Figur 22: Primærmodell for GT1.



Figur 23: Primærmodell for referansetak.



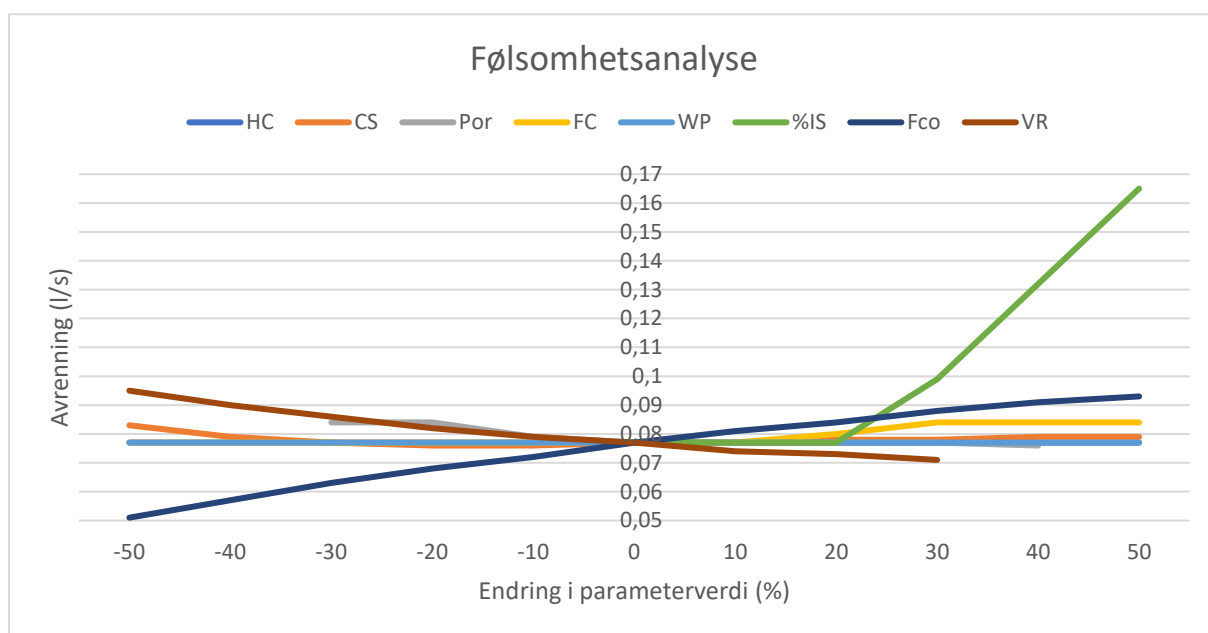
Figur 24: Primærmodell for GT2.

Tabell 17: Total avrenning(mm), maks avrenning (l/s) og NSME verdier for de tre takene i primærmodellen.

	Total avrenning	Maks avrenning	NSME
GT1	41,28	0,08	-0,97
REF	53,86	0,9	0,91
GT2	41,28	0,08	-5,04

6.3 Følsomhetsanalyse

Figur 25 viser parameterne som ble testet i følsomhetsanalysen. De parameterne som var relatert til jordlaget hadde generelt lite utslag i endring i maksimal avrenning, utenom Field capacity som ga en liten økning ved å justere parameteren opp. Derimot hadde initialtilstand for fuktighetsinnhold i systemet ved simuleringstart stor påvirkning. Ved en 50 % økning i denne parameteren ble avrenningstoppen økt med 114,29 %. Flow coefficient hadde størst utslag på reduksjon i avrenningstopp med 33,77 % ved -50 % endring i parameterverdi. Også Void ratio ga en viss reduksjon i avrenningstopp med 7,79 %. Tabell 18 viser en oversikt over alle parameterne og deres økning/reduksjon i avrenningstopp.



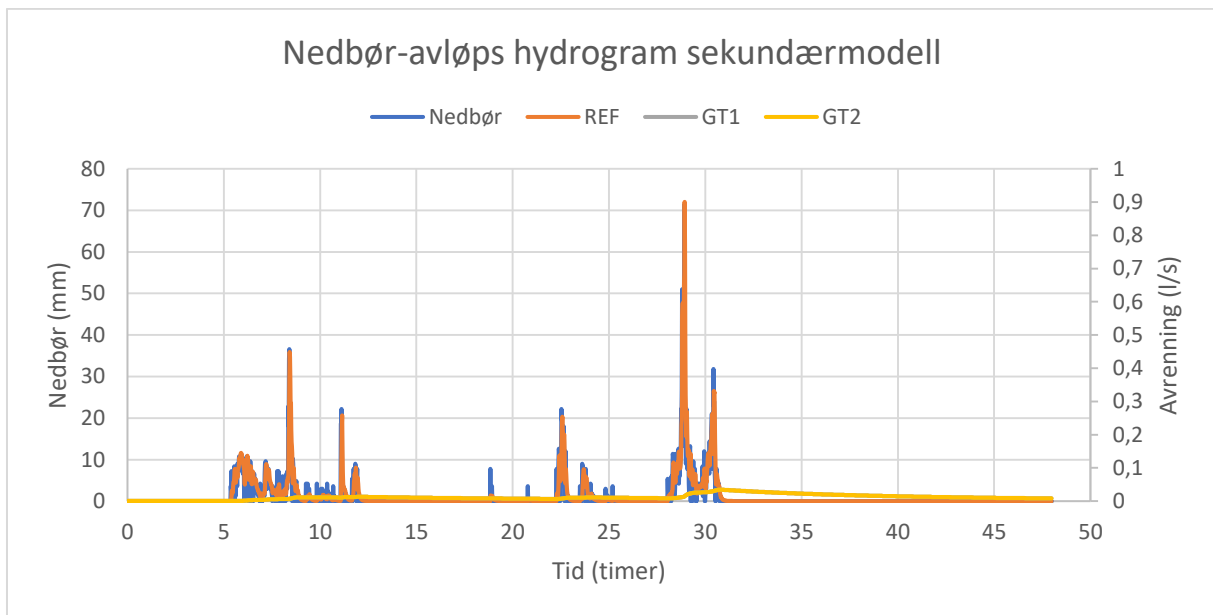
Figur 25: Følsomhetsanalyse av primærmodellen, presentert i stjernediagram. Forkortelser: Hydraulic conductivity(HC), Conductivity slope(CS), Porosity(Por), Field capacity(FC), Wilting point(WP), % Initially saturated(%IS), Flow coefficient(Fco), Void ratio(VR).

Tabell 18: Maks økning/reduksjon i avrenningstopp (a.t) for hver av de justerte parameterne (+/- 50% justering av opprinnelig verdi) i primærmodellen.

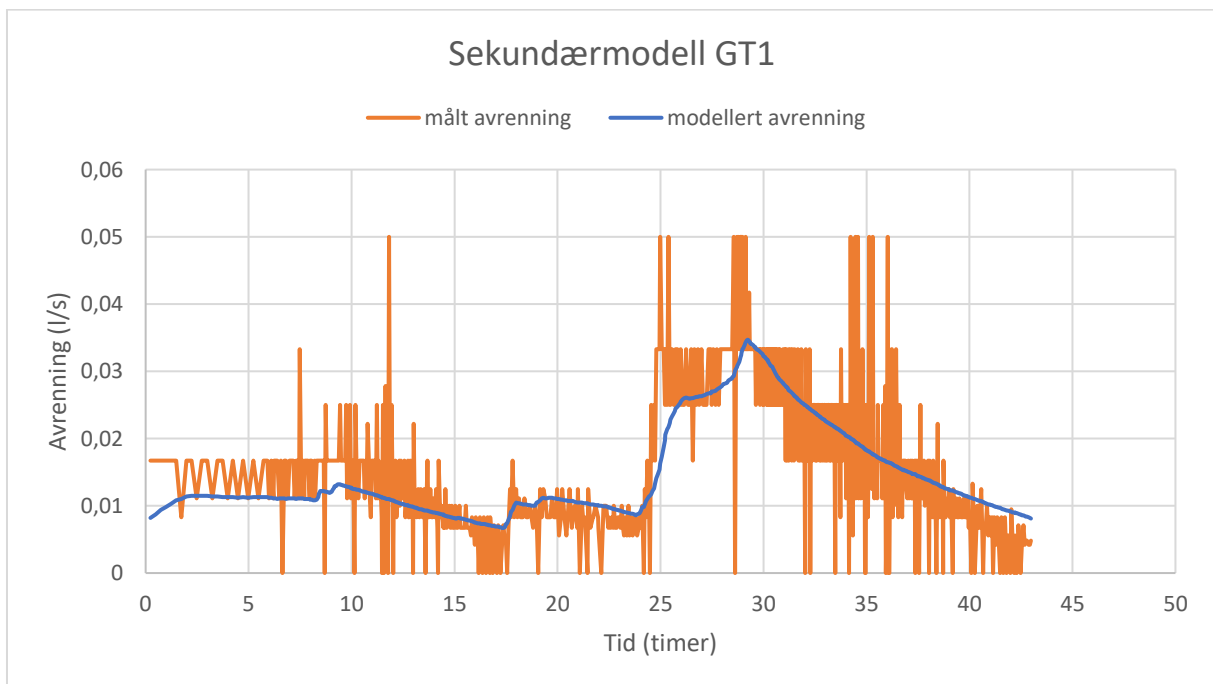
Parameter	Maks økning i a.t (%)	Maks reduksjon i a.t (%)
Hydraulic conductivity	0	0
Conductivity slope	7,79	1,3
Porosity	9,09	1,3
Field capacity	9,09	0
Wilting point	0	0
% Initially saturated	114,29	0
Flow coefficient	20,78	33,77
Void ratio	23,38	7,79

6.4 Sekundærmodell

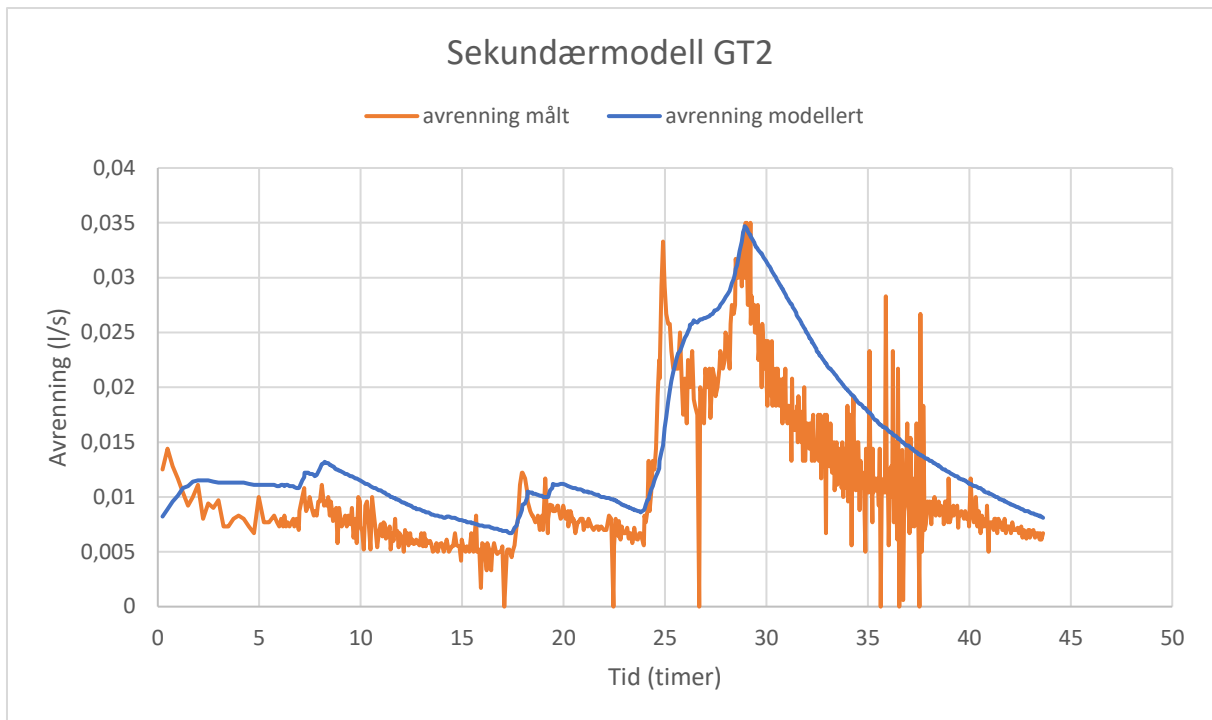
Total avrenning fra REF var 53,86 mm, og 40,84 mm for de grønne takene. Maks avrenning fra REF var 0,9 l/s, og 0,03 l/s for de grønne takene. Dette ga en reduksjon i total avrenning på 24,17 %, og 96,67 % i maks avrenning. Avrenningstoppen for REF var samme som i primærmodellen, mens for de grønne takene var det etter 30,75 timer, altså en utsettelsestid på 1,83 timer. NSME verdi for sekundærmodell GT1 var 0,61 og 0,45 for GT2. Figur 26 viser avrenning fra takene plottet mot hverandre og nedbørshendelsen. Figur 27 og 28 viser sekundærmodellens simulerte verdier opp mot observerte verdier fra GT1 og GT2. Tabell 19 viser en oversikt over total avrenning, maks avrenning og NSME verdier for takene.



Figur 26: Hydrogram for sekundærmodellen.



Figur 27: Sekundærmodell GT1.



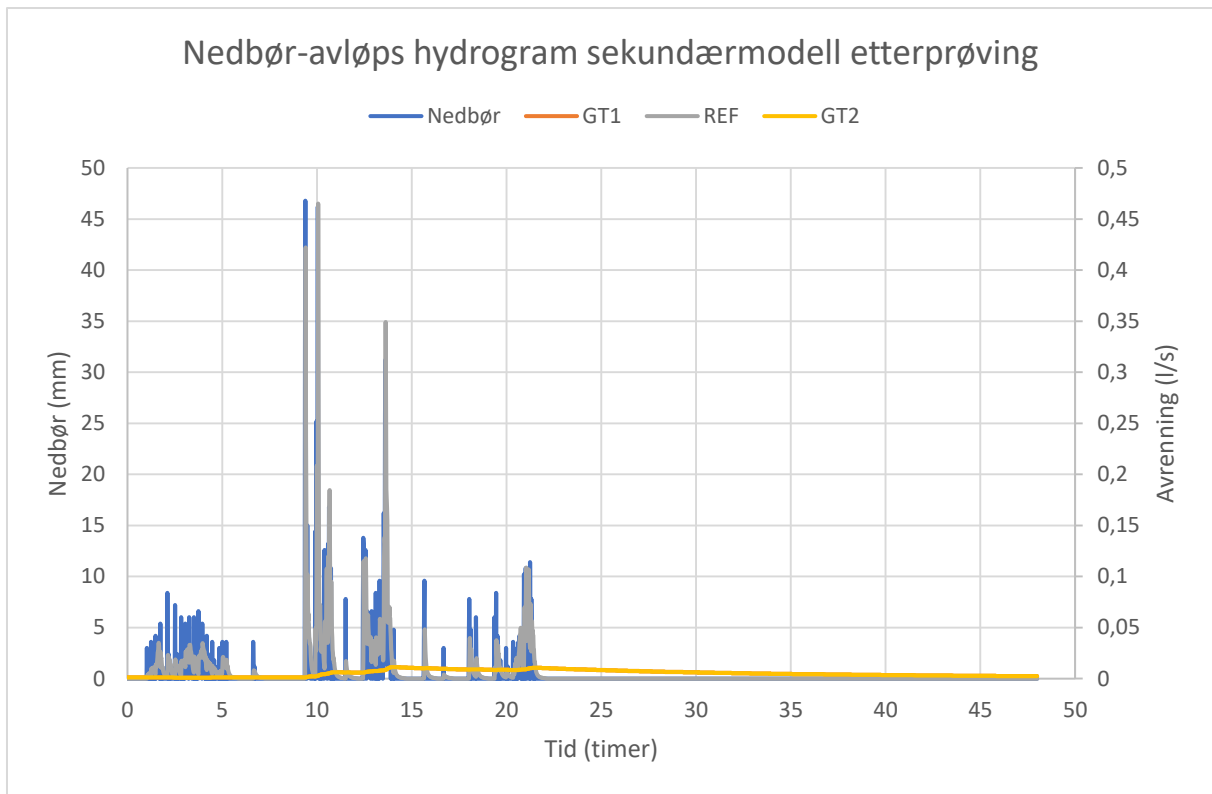
Figur 28: Sekundærmodell GT2.

Tabell 19: Total avrenning (mm), maks avrenning (l/s) og NSME verdier for de tre takene i sekundærmodellen.

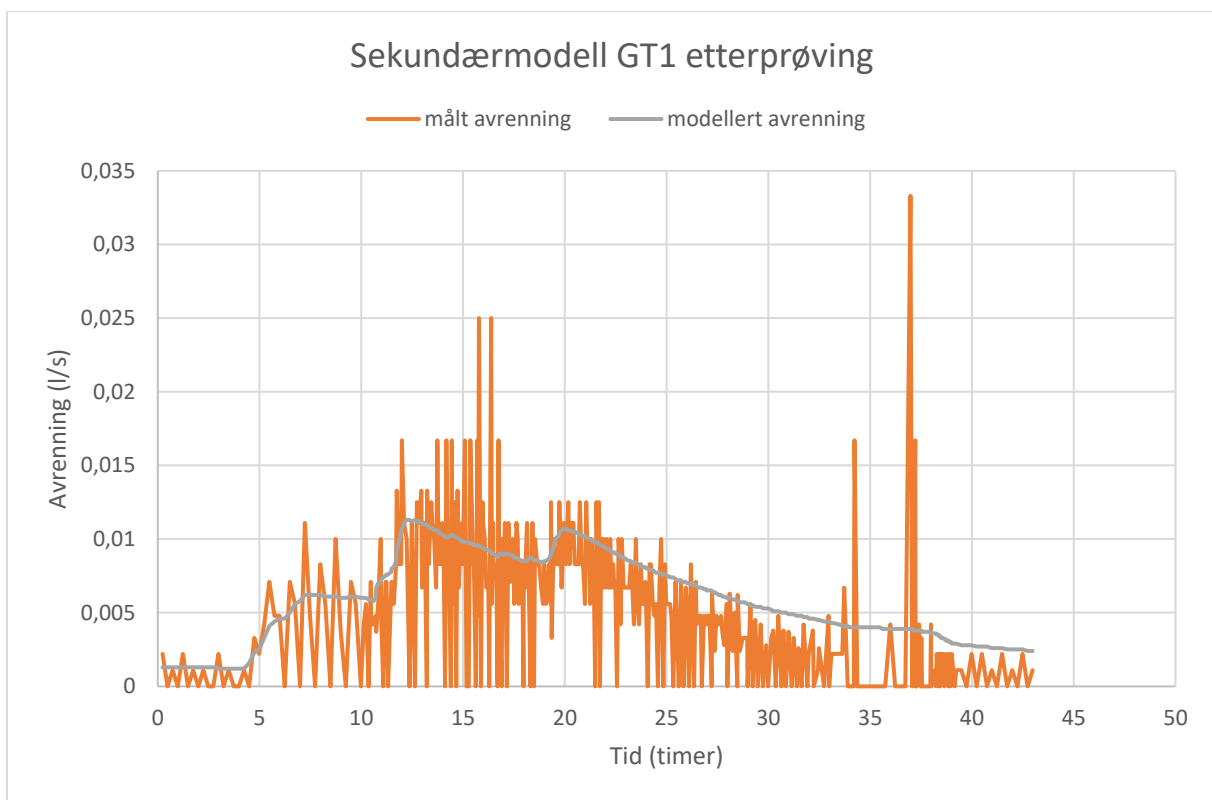
	Total avrenning	Maks avrenning	NSME
GT1	40,84	0,03	0,61
REF	53,86	0,9	0,91
GT2	40,84	0,03	0,45

6.5 Etterprøving

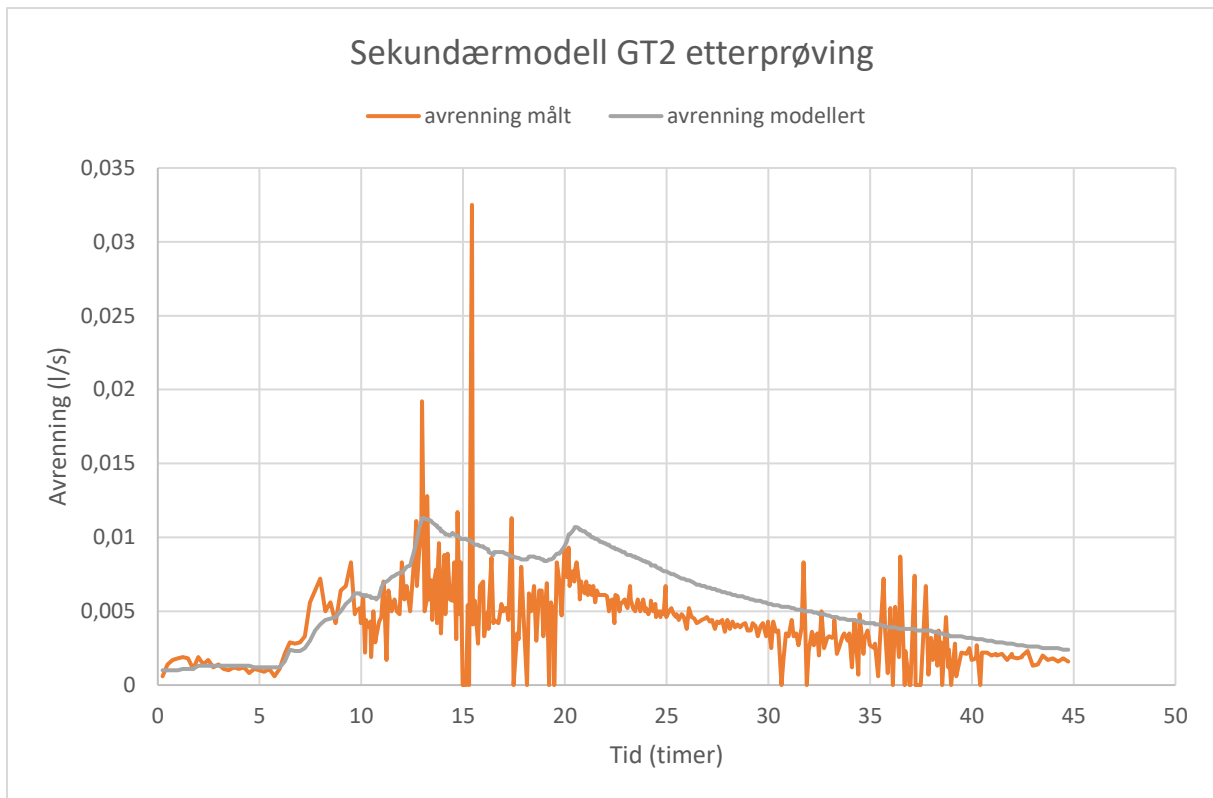
Total avrenning fra REF var 23,61 mm, og 17,87 mm for de grønne takene. Maks avrenning fra REF var 0,47 l/s, og 0,01 l/s for de grønne takene. Dette ga en reduksjon i total avrenning på 24,31 %, og 97,87 % i maks avrenning. Avrenningstoppen for REF var etter 10,05 timer, mens for de grønne takene var det etter 13,9 timer, altså en utsettelsestid på 3,85 timer. NSME verdi for sekundærmodell GT1 var 0,26 og -0,21 for GT2. Figur 29 viser avrenning fra takene plottet mot hverandre og nedbørshendelsen. Figur 30 og 31 viser sekundærmodellens simulerte verdier opp mot observerte verdier fra GT1 og GT2 ved hendelsen til etterprøving. Tabell 20 viser en oversikt over total avrenning, maks avrenning og NSME verdier for takene.



Figur 29: Hydrogram for etterprøving av sekundærmodell.



Figur 30: Etterprøving av sekundærmodell, GT1.



Figur 31: Etterprøving av sekundærmodell, GT2.

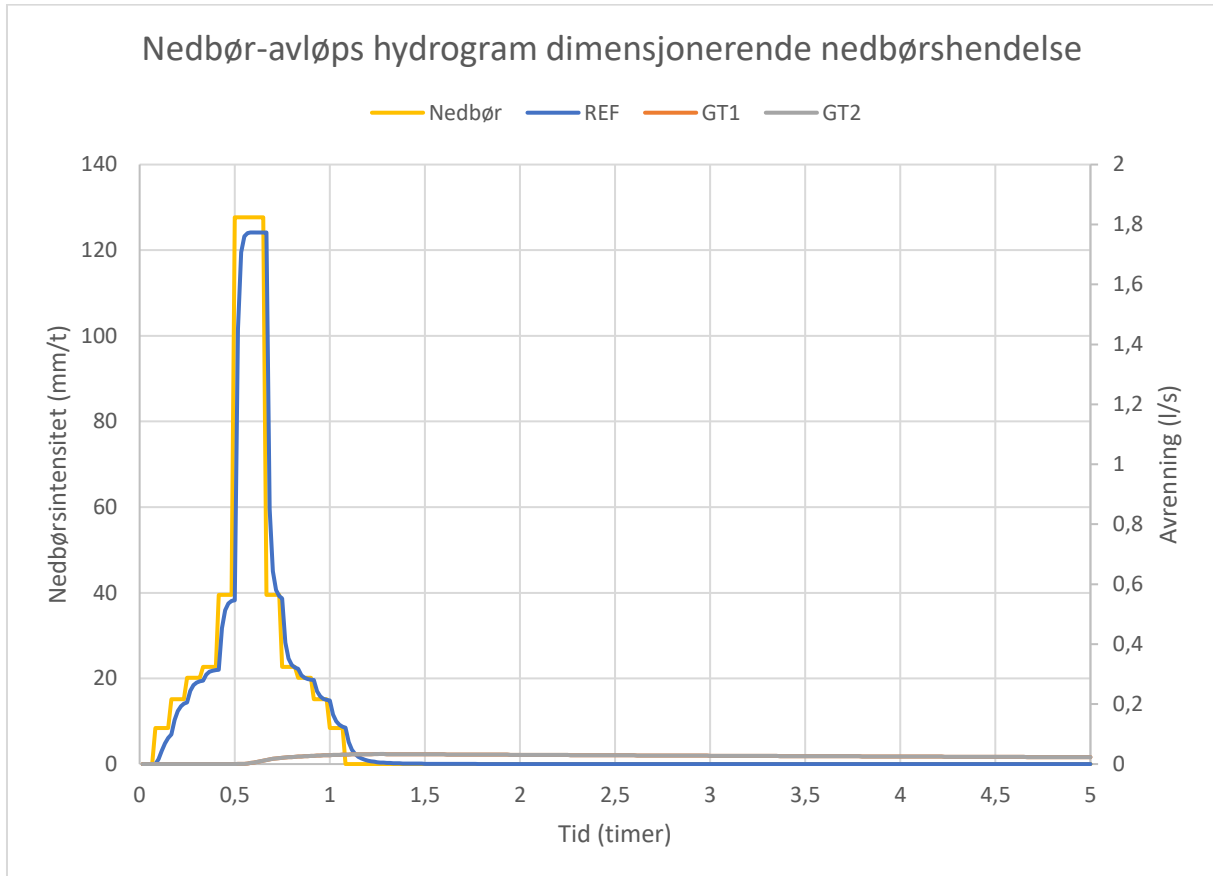
Tabell 20: Total avrenning (mm), maks avrenning (l/s) og NSME verdier for takene i etterprøving av sekundærmodell.

	Total avrenning	Maks avrenning	NSME
GT1	17,87	0,01	0,26
REF	23,61	0,47	0,91
GT2	17,87	0,01	-0,21

6.6 Dimensjonerende nedbørshendelse.

Figur 32 viser simulerte nedbør- og avrenningsverdier for den dimensjonerende hendelsen. Total nedbørsmengde var 38,92 mm. Total avrenning fra REF var 38,9 mm og 34,88 mm for de grønne takene. Maks avrenning fra REF var 1,77 l/s, og 0,03 l/s for de grønne takene. Dette ga en reduksjon i total avrenning på 10,33 %, og 98,31 % i maks avrenning. Avrenningstoppen for REF oppsto etter 0,6 timer, mens for de grønne takene var det etter

1,22 timer, altså en utsettelsestid på 0,62 timer. Tid før start på avrenning ble utsatt med ca. 25 minutter for de grønne takene i forhold til REF. Tabell 21 viser en oversikt over total- og maks avrenning, og tid før start/maks for hendelsen.



Figur 32: Hydrogram for den dimensjonerende nedbørshendelsen.

Tabell 21: Total avrenning (mm), maks avrenning (l/s), tid før maksimal avrenning inntraff (timer) og tid før avrenningsstart (timer) for den dimensjonerende nedbørshendelsen.

	Total avrenning	Maks avrenning	Tid før maksimal avrenning	Tid før start på avrenning
GT1	34,88	0,03	1,22	0,43
REF	38,9	1,77	0,6	0,017
GT2	34,88	0,03	1,22	0,43

7. Diskusjon

Målingene fra takene på Bia er preget av en del støy som kan virke forstyrrende på resultatene. Dette er ett usikkerhetsmoment som må tas i betraktning. Ett av støymomentene i dataserien er uberegnelige verdier. Med dette menes tilfeldige verdier som typisk ikke passer med forventede verdier. Fra instruksjonsmanualen til vannivåmåleren brukt ved Bia (Seametrics, 2018) kan dette være forårsaket av fuktighet som har kommet inn i systemet. Andre årsaker kan være skader på transduseren, ødelagt kabel, dårlig forbindelse eller feilaktig operering av avlesningsutstyret. Ett annet støymoment er oscillerende verdier (svingninger i datamålingene). I manualen er det oppgitt at oscillerende verdier kan forekomme ved endringer i det barometriske trykket. Dette kan være endringer i vannivået som en direkte konsekvens av endringer i trykket, eller fortettinger i kabelen.

Det er en vurderingssak om målingene egentlig er gode nok til å kunne si noe om fordrøyningssegenskapene til takene. Optimalt sett skulle målingene ha vært kvalitetssikret først, men dette ville krevd både tid og mer kunnskap om kvalitetssikring av måledata. Dette er noe som sikkert vil bli satt i gang etter hvert, enten av NVE eller andre interesserte. Det hadde også vært fordelaktig med tilgang på lengre dataserier, gjerne over flere år, slik at flere nedbørshendelser kunne blitt analysert. Dataserien som ble brukt i denne avhandlingen er generelt preget av få nedbørshendelser med lite nedbør og derfor veldig lave avrenningsmålinger.

Figur 18 viser at de grønne takene (GT1 og GT2) hadde en god evne til å holde tilbake nedbør, med en reduksjon i avrenning på henholdsvis 55,25 % og 52,17 % i forhold til REF for hele måleperioden. Denne reduksjonen kommer av tilbakeholdelseevnen til substratet, og fordampning av vann i jorda og vegetasjonen. Ved enkelthendelsen i figur 19 klarte de grønne takene å redusere total- og maksimal avrenning med henholdsvis 12,49 % og 93,09 % for GT1, og 31,33 % og 95,16 % for GT2. Dette viser at de grønne takene klarte å redusere avrenning i større grad totalt sett over hele måleperioden enn ved enkelthendelsen. De grønne takene er også veldig effektive på å redusere avrenningstopper, med over 90 % reduksjon for begge takene.

I figur 18 er det observert en differanse i akkumulert nedbør og akkumulert avrenning fra REF. I teorien burde denne differansen vært 0, da avrenningen fra ett tett tak skal være lik nedbørsmengden som faller på taket. En mulig årsak til dette kan være støymomentene som beskrevet tidligere. Det kan også være at noe av nedbøren ble lagret i små depresjoner i taket. Figuren viser også en differanse i avrenningsmålingene mellom de to grønne takene. Dette kan være pga. støy i målingene, men også andre faktorer kan påvirke denne differansen, bla. vindretning som påvirker hvor mye nedbør som faller på takene. Det er også umulig å konstruere de grønne takene helt like, så det kan være små forskjeller i takkonstruksjonen som kan påvirke avrenningsmengden. En feilkilde oppgitt i (Øyre & Trommald, 2018, ss. 82-83): «Ved utlegging av LECA ble det observert ulik kornstørrelse på finknust LECA i storsekkene. En av storsekkene som ble fordelt utover Nektar inneholdt mye finstoff. Dersom blir avvik mellom målt avrenning fra takene kan dette være en mulig feilkilde.»

Ved enkelthendelsen 21.09 (figur 20) klarte de grønne takene å redusere total avrenning og maksimal avrenning med henholdsvis 45,01 % og 93,3 % for GT1, mens 53,05 % og 91,29 % for GT2. Dette viser at de grønne takene klarte å holde tilbake mer avrenning ved hendelsen 21.09 enn ved hendelsen 09.09-10.09. En av grunnene til dette var nok at det hadde vært en

nedbørshendelse like før hendelsen 09.09-10.09 og derfor kan det antas at fuktighetsinnholdet i takene var høyere ved nedbørsstart. For demping av avrenningstopp var takene ganske like ved begge hendelsene.

Primærmodellen i SWMM ga som forventet lave NSME verdier for begge de grønne takene med -0,97 for GT1 og -5,04 for GT2. Dette er veldig lave verdier, som indikerer at primærmodellen ikke er noe god til å predikere avrenningen. En negativ NSME verdi betyr at modellen gir dårligere match med målte verdier enn gjennomsnittet av alle målepunktene. Med andre ord, en «modell» med gjennomsnittsverdier av måledata vil treffe målepunktene bedre enn primærmodellen. REF hadde en NSME verdi på 0,91, som er en veldig god predikasjon. Dette er forståelig da SWMM modellen regner REF som 100 % Impervious (tett) og all nedbøren ender opp som avrenning. Derfor der det ingen parametere som trengs å anslås for REF. Det er også en tendens til mindre støy i datamålingene for observerte verdier fra REF enn de grønne takene, som gir en høyere NSME verdi. Figur 22, 23 og 24 viser hvordan støy påvirker målingene fra GT1 og GT2 mer enn REF. For de grønne takene er prosessen fra nedbør til avløp mer komplisert og vanskeligere å få til å stemme med observerte verdier. Mange av parameterverdiene ble hentet fra tidligere publiserte studier om avrenning fra grønne tak, og gir derfor ikke nødvendigvis noe god representasjon av takenes virkelige parameterverdier. Det er sannsynlig at en kombinasjon av støy i målingene og mange ukjente parametere er grunnen til de lave NSME verdiene.

Følsomhetsanalysen i figur 25 viser at parameterne i jordlaget er av mindre betydning for maksimal avrenning. Ingen av disse parameterne klarte å redusere maksimal avrenning, utenom porøsiteten (Por) og stigningstallet til takets hydrauliske konduktivitet (CS). Det er initialverdien for fuktighetsinnholdet (%IS) og koeffisient for utstrømning (Fco) som gir størst utslag. Dette gir mening da det er disse som styrer vanninnholdet i taket ved start av simuleringen og utstrømningen fra taket. Forholdet mellom hulrom og faste stoffer i LECA laget (VR) hadde også en liten effekt på reduksjon i maksimal avrenning. Grunnen til at parameterne i LECA laget har større effekt i reduksjon av maksimal avrenning enn parameterne i jordlaget er fordi tykkelsen på LECA laget er større enn jordlaget som gjør at LECA laget kan lagre mer vann.

Sekundærmodellen i SWMM ga høyere NSME verdier enn primærmodellen, som er forventet. NSME verdiene var 0,61 for GT1 og 0,45 for GT2. Figur 27 og 28 viser at de simulerte verdiene passer rimelig bra med observerte verdier. Det er nok sannsynlig at med så mye støy i dataserien ville NSME verdiene aldri kunne nærmet seg 1,0 uansett hvor godt parameterne ble justert. De grønne takene fikk en lavere NSME verdi for sekundærmodellen i hendelsen til etterprøving i figur 14 enn hendelsen i figur 15. Det skal ikke legges for mye vekt i dette, da det er vanskelig å få en modell som er kalibrert for en hendelse til å stemme med en helt annen hendelse. Det var også mindre nedbør i hendelsen til etterprøving, som gjør at disse ikke kan sammenliknes.

Ved den dimensjonerende nedbørshendelsen i figur 16 klarte de grønne takene å holde tilbake hele nedbørsmengden uten noe overflateavrenning. Dette er pga. den store lagringskapasiteten til det underliggende LECA laget. Total nedbørsmengde ved hendelsen var 38,92 mm som gir en total vannmengde på 1.946 m³. Ifølge (Øyre & Trommald, 2018) har LECA laget med ett antatt porevolum på 50 % en total fordrøyningskapasitet på 3,98 m³. Dvs. at det er mer enn nok kapasitet til å håndtere en slik nedbørshendelse.

En svakhet ved kalibreringen av SWMM modellen er at parameterne ble kalibrert hver for seg. Dette var både tidskrevende og lite hensiktsmessig. Når hver parameter blir justert individuelt for å tilpasse en modell mot observerte verdier blir ikke kalibreringen optimalisert. En måte å kunne forbedret dette på er hvis det ble kjørt ett systematisk/automatisk parametersøk, slik at alle parameterne ble justert samtidig for å tilpasse modellen best mulig. Det er ingen alternativer for automatisk kalibrering i SWMM programvaren, men det finnes ulike kalibreringsverktøy som kan kjøres ved siden av SWMM. Bla. ble det brukt en Shuffled Complex Evolution Algorithm i (Russwurm, et al., 2018) for å optimalisere parametersøket. Det er også vanskelig å modellere grønne tak ved å kun se på enkelthendelser, da en hendelse ofte henger sammen med andre hendelser. Dette gjelder spesielt for større regnhendelser som figur 19, som ofte er sammensatt av flere små regn.

Noen svakheter ved SWMM modellen:

- Initialverdien til fuktighetsinnholdet ved simuleringstart regnes både for jordlaget og det magasinerende laget. Dvs. at ved en initialverdi større enn 0 vil det simuleres avrenning fra magasinet selv om fuktighetsinnholdet i jordlaget er under feltkapasitet.
- Storage layer i Bioretention Cell har ingen parameter for hydraulisk konduktivitet. Dette forenkler modellen ved at det ikke blir tatt hensyn til hvilken type materiale som magasinet består av. I en Bioretention Cell er det brukt Gravel (grus) som materiale. Takene i Bia bruker LECA. Disse to materialene kan ha ulike fysiske egenskaper.
- Void ratio i Storage layer har en maks inputverdi lavere enn 1,0. Dette er feil, da denne verdien kan være større enn 1,0 utifra formelen gitt i SWMM Help:

$$Porosity = void\ ratio / (1 - void\ ratio) \quad (18)$$

Eksempelvis fra primærmodellen vil en porøsitet på 0,75 gi en Void Ratio på 3,0. Fra følsomhetsanalysen i figur 30 er det derfor mulig å kunne redusere maks simulert avrenning enda mer ved Void ratio verdier større enn 1,0.

8. Konklusjon

Undersøkelser av grønne tak er veldig «site specific», som innebærer at resultatene kun gjelder for det aktuelle området, og kan derfor ikke brukes som en predikasjon for grønne tak i andre områder. Dette er viktig å poengtere da alle konklusjoner i dette kapittelet kun gjelder for de grønne takene i Bia og ikke sier noe om den generelle funksjonen til alle grønne tak. Det er også mange usikkerhetsmomenter med takene og støy i målingene som kan påvirke resultatene.

- De grønne takene hadde en tydelig reduserende effekt på akkumulert avrenning i forhold til REF over hele måleperioden.
- Det ble observert en større prosentvis reduksjon i akkumulert avrenning totalt sett gjennom hele måleperioden enn ved begge enkelthendelsene i figur 19 og 20. Dette tyder på at takene er mer effektive ved nedbør som faller jevnt over lengre perioder enn korte intense nedbørshendelser.
- Avrenningstoppene ble redusert med over 90 % i forhold til REF for de grønne takene ved begge enkelthendelsene. Det var ingen stor forskjell i reduksjon mellom de to hendelsene, som kan tyde på at størrelsen og intensiteten på nedbørshendelsen ikke har så mye å si for takenes evne til å dempe avrenningstoppene.
- Begge de grønne takene klarte å utsette tid før start på avrenningen og tid før avrenningstopp inntraff. Det er vanskelig å gi noen konklusjon ut ifra resultatene da fuktighetsinnholdet i takene før nedbørsstart var ukjent ved begge hendelsene.

Måleperioden varte kun i måneder med temperaturer over 0 grader og ingen nedbør i form av snø. Derfor kan det f.eks. ikke sies noe om hvordan disse takene vil fungere i vinterhalvåret, og hvordan snødekke oppå taket påvirker avrenningen.

For SWMM modellen:

- Primærmodellen var ikke tilstrekkelig til å predikere avrenning fra de grønne takene, og ga negative NSME verdier for begge takene. Dette vil si at modellen ga dårligere match en gjennomsnittet av alle observerte målinger.
- Sekundærmodellen ga bedre NSME verdier enn primærmodellen, men også denne modellen må sies å være relativt dårlig på å predikere avrenningen da verdien for GT2 var lavere enn 0,5.
- Etterprøvingen av sekundærmodellen ga også lave NSME verdier. Det skal dog ikke legges for mye vekt i dette da det var observert mindre nedbør i hendelsen til etterprøving. Støynivåene i hendelsene kan heller ikke sammenliknes.
- Begge de grønne takene klarte å holde tilbake hele nedbørsmengden ved den dimensjonerende nedbørshendelsen. Dette var forventet da kapasiteten på LECA laget er så stor at det klarer å holde tilbake en slik hendelse med god margin. Dette betyr at de grønne takene er riktig dimensjonert i forhold til framtidige klimaendringer.

I dette tilfellet klarte ikke SWMM modellen å predikere avrenning fra de grønne takene tilstrekkelig. Det betyr ikke nødvendigvis at SWMM modellen er dårlig på å predikere avrenning fra grønne tak, men med metoden som ble brukt i denne avhandlingen var den ikke god nok. Med kvalitets sikring av måledata på forhånd og alternativ for automatisk parametersøk ville kanskje modellen gitt bedre resultater.

9. Referanser

- Aarrestad, P. A., Bjerke, J. W., Follestad, A., Jepsen, J. U., Nybø, S., Rusch, G. M., & Schartau, A. K. (2015). *Klimaendringenes påvirkning på naturmangfoldet i Norge*. Norsk Institutt for naturforskning. Hentet fra <http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2016/Mars-2016/Klimaendringenes-pavirkning-pa-naturmangfoldet-i-Norge/>
- Bengtsson, L. (2005). Peak flows from thin sedum-moss roof. *Hydrology Research*, 36 (3), ss. 269-280. Hentet fra <https://iwaponline.com/hr/article-abstract/36/3/269/625/Peak-flows-from-thin-sedum-moss-roof?redirectedFrom=fulltext>
- Bergknapp. (2018). *FDV for SEDUM TIL FLATE TAK 7-20 °*. Hentet fra <http://www.ferdigplen.no/produkter/FDV%20BERGKNAPP%20TAK%207%20-%2020%20GRADER.pdf>
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36 (4), ss. 351-360. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857410000029>
- Burszta-Adamiak, E., & Mrowiec, M. (2013, Juli). Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science & Technology*, 68 (1), ss. 36-42. Hentet fra <https://iwaponline.com/wst/article-lookup/doi/10.2166/wst.2013.219>
- Butler, D., & Davies, J. (2010). Effects of urbanisation on drainage. I *Urban Drainage* (3. utg., ss. 2-5). Spon Press.
- Carter, T. L., & Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, 42 (5), ss. 1261-1274. Hentet fra <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x>
- Cipolla, S. S., Maglionico, M., & Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering*, 95, ss. 876-887. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416304608>
- DeNardo, J. C., Jarrett, A. R., Manbeck, H. B., Beattle, D. J., & Berghage, R. D. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 48 (4), ss. 1491-1496. Hentet fra <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=19181&t=2&redir=&redirType=>
- De-Ville, S., Menon, M., Jia, X., Reed, G., & Stovin, V. (2017). The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. *Journal of Hydrology* 547, ss. 332-344. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417300768>
- Dingman, L. S. (2008). Basic Hydrologic Concepts. I L. S. Dingman, *Physical Hydrology* (2. utg.). Waveland Pr Inc.
- DSB. (2016). *Risikoanalyse av regnflom i by*. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). Hentet fra

- https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/rapporter/delrapport_regnflom_2016.pdf
- Evans, R., & Cassel, D. (1996). *Soil, water and crop characteristics important to irrigation scheduling*. Hentet Oktober 15, 2018 fra NC State Extension Publications: <https://content.ces.ncsu.edu/soil-water-and-crop-characteristics-important-to-irrigation-scheduling>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007, Desember 3). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31 (4), ss. 225-231. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857407001309>
- Grande, T. R. (2018, Oktober 1). *Norske byer tåler ikke store regnskyl*. Hentet November 2018 fra Norges miljø- og biovitenskapelige universitet: <https://www.nmbu.no/aktuelt/node/34752>
- Hanssen-Bauer, L., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., . . . Ådlandsvik, B. (2015). *Klima i Norge 2100*. Norsk klimaservicesenter (NKSS). Hentet fra <http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2015/September-2015/Klima-i-Norge-2100/>
- Johannessen, B. G., Muthanna, T. M., & Braskerud, B. C. (2018). Detention and Retention Behavior of Four Extensive Green Roofs in Three Nordic Climate Zones. *Water* 2018, 10 (6), s. 671. Hentet fra <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/6/671>
- Leca. (2014). *FDV-dokumentasjon Leca Lettklinker*. Hentet 2018 fra https://leca.no/sites/default/files/Teknisk_info/FDV/FDV_Leca_Lettklinker_2014.pdf
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Særgrov, S., Jakobsen, G., & Aaby, L. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*. Norsk Vann. Hentet fra <https://norskvann.no/index.php/component/hikashop/produkt/801-a162-veiledning-i-klimatilpasset-overvannshandtering?Itemid=780>
- Magnussen, K., Reinvang, R., & Løset, F. (2015). *Økosystemtjenester fra grønnstruktur i norske byer og tettsteder*. Vista Analyse. Hentet fra <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M378/M378.pdf>
- Mentens, J., Hermy, M., & Raes, D. (2006). Green Roofs as a Tool for Solving the Rainwater Runoff Problem in the Urbanized 21st Century. *Landscape and Urban planning*, ss. 217-226. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204605000496>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2003). Greenroofs as a part of urban water management, 61. I C. Brebbia, *Water Resources Management II* (ss. 35-44). WIT Press. Hentet fra Department of Land Management, KULeuven, Belgium: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/61/2610>
- Miljødirektoratet. (2016). *Overvannshåndtering*. Hentet Oktober 1, 2018 fra Klimatilpassing: <http://www.klimatilpassing.no/sektorer/vann-og-avlop/oppgaver/handtering-av-overvann/>

- Noreng, K., Kvalvik, M., Busklein, J. O., Ødegård, I. M., Clewing, C. S., & French, H. K. (2012). *Grønne tak, Resultater fra et kunnskapsinnhentingsprosjekt*. Sintef akademisk forlag. Hentet fra https://www.sintefbok.no/book/index/932/groenne_tak_resultater_fra_et_kunnskapsinnhentingsprosjekt
- Norsk Klimaservicesenter. (2018). *Nedbørsintensitet*. Hentet November 1, 2018 fra <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>
- NVE. (2018). *Sildre*. Hentet Oktober 25, 2018 fra Norges vassdrags- og energidirektorat: <http://sildre.nve.no/Sildre/Station/5.10.0>
- Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, ss. 361-368. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415004631?via%3Dihub>
- Regjeringen. (2015). *Overvann i byer og tettsteder*. Utredning. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2015-16/id2465332/>
- Rosa, D. J., Clausen, J. C., & Dietz, M. E. (2015). Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. *Journal Of The American Water Resources Association*, 51 (3), ss. 746-757. Hentet fra <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jawr.12272>
- Rossmann, L., & Huber, W. (2016a). *SWMM Reference Manual Volume I—Hydrology*. Hentet fra United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Rossmann, L., & Huber, W. (2016b). *SWMM Reference Manual Volume III—Water Quality*. Hentet fra United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Russwurm, I. L., Johannessen, B. G., Gagne, A. S., Lohne, J., Muthanna, T. M., & Fridthjofsdottir, E. G. (2018). Modelling green roof detention performance in cold climates. *EPiC series in engineering*, ss. 1804-1813. Hentet 2018 fra <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2568455>
- Seametrics. (2018). *PT12 Pressure/Temperature Sensor Instructions*. Hentet 2018 fra <https://www.seametrics.com/wp-content/uploads/LT-14372r18-20180306-PT12-Instr.pdf>
- Snodgrass, E., & McIntyre, L. (2010). *The Green roof manual, a professional guide to design, installation and maintenance*. Timber Press.
- Statistisk Sentralbyrå. (2018). *Befolkningsframskrivinger*. Hentet Oktober 2, 2018 fra <https://www.ssb.no/befolkning/statistikker/folkfram/aar>
- Stovin, V., & Peng, Z. (2017). Independent Validation of the SWMM Green Roof Module. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (9). Hentet fra <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001558>
- Thorolfsson, S. (2012). VA-hydrologi. I H. Ødegaard (Red.), *Vann- og avløpsteknikk* (1. utg., ss. 52-79). Norsk Vann.

- USGV. (2016). *U.S. Geological Survey*. Hentet Oktober 1, 2018 fra <http://water.usgs.gov/edu/watercyclenorwegian.html>
- VanWoert, N., Rowe, B., Andresen, J., Rugh, C., Fernandez, R. T., & Xiao, L. (2005). Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth. *Journal of Environmental Quality*, 34 (3), ss. 1036-1044. Hentet fra <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/34/3/1036>
- Villarreal, E. L. (2007). Runoff detention effect of a sedum green-roof. *Hydrology Research*, 38 (1), ss. 99-105. Hentet fra <https://iwaponline.com/hr/article-abstract/38/1/99/713/Runoff-detention-effect-of-a-sedum-green-roof?redirectedFrom=fulltext>
- Villarreal, E. L., & Bengtsson, L. (2005). Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*, 25 (1), ss. 1-7. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857404001740>
- Voyde, E., Fassman, E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 394 (1-2), ss. 384-395. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410005937>
- Yr. (2018). Ås (NMBU) målestasjon, Ås (Akershus). Hentet November 5, 2018 fra [https://www.yr.no/sted/Norge/Akershus/%C3%85s/%C3%85s_\(NMBU\)_m%C3%A5lestasjon/statistikk.html](https://www.yr.no/sted/Norge/Akershus/%C3%85s/%C3%85s_(NMBU)_m%C3%A5lestasjon/statistikk.html)
- Øyre, A. S., & Trommald, J. (2018). *Etablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak*. Hentet fra Norges miljø- og biovitenskapelige universitet: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2505728>
- Åstebøl, S. O., Robba, S., Stenvik, G., Kristoffersen, H. V., & Olsen, S. B. (2013). *På lag med regnet, veileder for lokal overvannshåndtering*. COWI. Hentet fra http://www.miljodirektoratet.no/Global/klimatilpasning/COWI_Veileder%20overvann%20overvannsh%C3%A5ndtering%20J%C3%A6ren_2013.pdf

10. Vedlegg

Vedlegg 1



Figur 33: IVF-kurve for Ås - Rustadskogen, Ås, Akershus. 1-60 minutters varigheter. Returperioder 2-200 år. Verdier i mm. (Norsk Klimaservicesenter, 2018).

Vedlegg 2

Tabell 22: Tabellvisning av IVF-kurven i figur 29. 1-60 minutters varigheter. Returperioder 2-200 år. Verdier i mm. (Norsk Klimaservicesenter, 2018).

Returverdi for nedbør (mm)										
RETURPERIODE (ÅR)	VARIGHET (MINUTTER)									
	1	2	3	5	10	15	20	30	45	60
2	1.8	3.1	4.2	5.8	8.5	10.2	11.5	12.8	14.3	15.3
5	2.2	3.9	5.3	7.5	11.4	13.6	15.1	17.1	19.3	20.8
10	2.4	4.4	6.0	8.7	13.4	15.9	17.6	19.9	22.5	24.3
20	2.7	4.9	6.8	9.7	15.2	18.1	19.9	22.6	25.7	27.8
25	2.8	5.1	7.0	10.1	15.8	18.8	20.6	23.5	26.7	28.9
50	3.0	5.6	7.7	11.1	17.6	20.9	22.9	26.2	29.8	32.2
100	3.2	6.1	8.4	12.2	19.4	23.1	25.1	28.8	32.9	35.6
200	3.5	6.6	9.1	13.2	21.2	25.2	27.3	31.4	35.9	38.9



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway