

Overvannshåndtering ved bruk av ekstensive grønne tak og dens effekt på snølagring i et kaldt klima

Joar Sture

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Tone Merete Muthanna, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk

Abstract

The aim of this thesis is to analyze the effect of extensive green roofs as a stormwater management tool in the city of Trondheim, Norway. The research facility is located at Risvollan where hydrological data is gathered from four extensive green roofs, named A, B, C and D. In this thesis, hydrological data was gathered from the research facility from July 2014 to May 2015 where unfortunately there was some malfunction in the measuring devices in the months of September, October and November 2014. Hydrological systems are nonlinear, rainfall and runoff data are nonstationary processes and runoff data from the facility contains noise. However in this project there is constructed an algorithm to denoise the runoff data. Looking at the runoff results from the roof, there is no clear difference between the different types of extensive green roofs. But since the thickness and the weight are lower in roof A, the results are more favorable for this roof. The average reduction of the rainfall runoff in this period is 36,9 %, 25,4 %, 31,0 % and 31,7 % for roof A, B, C and D, respectively. The retention of rainwater on green roofs is lower in the autumn and winter than in the summer. Green roofs can therefore be a useful tool for reducing urban rainfall runoff, but in order to get a greater view of the effects of extensive green roofs in Trondheim, there is a need for long term monitoring of the green roofs.

Sammendrag

Målet med denne masteroppgaven er å analysere effekten ved bruk av ekstensive grønne tak som et lokalt overvannstiltak i Trondheim. Forskningsanlegget ligger på Risvollan der det samles data fra fire ulike ekstensive grønne tak benevnt med bokstavene A, B, C og D. I denne oppgaven er det arbeidet med hydrologiske data fra og med juli 2014 til mai 2015, der det oppstod noen uheldige målefeil i trykksensorene september, oktober og november 2014. Hydrologiske data som nedbør og overflateavrenning består av ikke-stasjonære prosesser samt at hydrologiske systemer ikke er lineære, og til dette er det konstruert en egen algoritme for behandling av støy i avrenningsdata fra de ulike takrutene. Til analyseringsarbeidet er det sett på avrenningsresultatene fra de ulike takrutene ved ulike nedbørhendelser og av disse enkeltresultatene er det ingen tydelige forskjeller av den reduserte overvannsmengden mellom de ulike takrutene. Men etter som takrute A er av en mindre tykkelse og med en lavere egenvekt enn de andre takrutene, er resultatene i favør til denne takruten. Den gjennomsnittlige reduseringen av nedbørvann fra takrutene gjennom prosjektets periode er på 36,9 %, 25,4 %, 31,0 % og 31,7 % for henholdsvis takrute A, B, C og D. Dette tyder på at grønne tak kan være et aktuelt tiltak for overvannshåndtering i urbane områder. Avrenningen fra de ulike takrutene er lavest i sommerperioden og størst ved høst og vinteren. For tydeligere resultater av effekten ved bruk av ekstensive grønne tak i Trondheim er det nødvendig med mer data og videre analysering over lengre tid.

Forord

Denne masteroppgaven er utført våren 2015 ved institutt for vann- og miljøteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskapelig universitet i Trondheim. Oppgaven er en besvarelse i emnet TVM 4905 Vannforsynings- og avløpsteknikk og utgjør 30 studiepoeng. Oppgaven omfatter et litteraturstudium, driftsbesøk og datainnsamling fra forskningsanlegget ved Risvollan samt håndtering av data.

Jeg vil rette en stor takk til hovedveileder førsteamanuensis Tone Merete Muthanna ved institutt for vann- og miljøteknikk for god veiledning og hjelpelighet gjennom oppgavens periode. Jeg vil også gi en stor takk til medveileder PhD-kandidat Birgitte Gisvold Johannesen som har deltatt i driftsbesøkene og forsynt meg med data fra forskningsanlegget samt kommet med gode konstruktive innspill underveis.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	1
2	Overvannshåndtering	2
3	Klimaendringer og urbanisering	5
4	Urban hydrologi	5
5	Grønne tak	7
	5.1 Vannkvalitet fra grønne tak	8
	5.2 Oppbygning av grønne tak	8
	5.3 Ekstensive grønne tak	9
	5.4 Faktorer som påvirker effekten til grønne tak	10
6	Hydrologiske prosesser forbundet med grønne tak.....	15
	6.1 Evapotranspirasjon	15
	6.2 Intersepsjon.....	18
	6.3 Jordsubstratets sammensetning.....	18
	6.4 Vannlagring i jordsubstrat	20
	6.5 Avrenning av vann i jord	20
	6.6 Vannets bruksområde og status i jord.....	21
	6.7 Infiltrasjon	23
	6.7.1 Faktorer som påvirker infiltreringen	24
	6.8 Beregning av infiltrering	25
	6.8.1 Green Ampt modellen	26
	6.9 Snø og snøsmelting.....	29
7	Grønne tak på Risvolla.....	32
	7.1 Takrutene ved forsøksanlegget.....	34
	7.1.1 Takrute A.....	34
	7.1.2 Takrute B.....	34
	7.1.3 Takrute C.....	35
	7.1.4 Takrute D.....	35
	7.2 Måleutstyret ved forsøksanlegget.....	36
8	Behandling av data.....	39
	8.1 Automatiske funksjoner og fremgangsmåter.....	40
	8.1.1 Påvirkning ved bruk av beregningsmetodene	42

8.2	Data til grafiske fremstillinger	44
8.2.1	Utfordringer.....	45
8.2.2	Glidende gjennomsnitt	45
8.2.3	Algoritmen i dette prosjektet.....	46
8.2.4	Wavelet transformasjonen.....	49
9	Avrenning fra ekstensive grønne tak på Risvolla	50
9.1	25.juli 2014.....	51
9.2	18.august til 20.august 2014	53
9.3	20.august til 21.august 2014	56
9.4	28.desember 2014 til 4.januar 2015.....	59
9.5	8.februar til 10.februar 2015	63
9.6	Oppsummering av avrenningsresultatene.....	67
9.7	Bruk av RECARGA som et simuleringsprogram.....	69
9.7.1	25.juli 2014.....	71
9.7.2	17.august 2014	73
9.7.3	20.august 2014	74
9.7.4	Oppsummering	75
10	Diskusjon.....	77
11	Konklusjon.....	79
12	Bibliografi	81
13	Visual Basic Algoritme	84
14	Vedlegg A	86

Liste av figurer

Figur 1: Overgangen fra et tradisjonelt rørbasert system til et mer bærekraftig system for håndtering av overvann (Stahre, 2005)	2
Figur 2: Grupperinger av åpne overvannsløsninger (Stahre, 2005)	3
Figur 3: Norsk vanns treleddsstrategi (Lindholm, et al., 2008)	4
Figur 4: Urbaniseringens effekt på overflateavrenningen (Sintef, 2012).....	6
Figur 5: Oppbygning av grønne tak sammenlignet med naturen (Noreng, et al., 2012).....	9
Figur 6: Sammenheng mellom valg av vegetasjon, plantenes strukturelle oppbygning og avrenning fra grønne tak (Nagase & Dunnett, 2011)	12
Figur 7: a) Avrenning i en sommerperiode og b) avrenning i en vinterperiode (Mentes, et al., 2005).....	13
Figur 8: Vannstatus i et jordlag (Dingman, 2008)	21
Figur 9: Modifisert utgave av Green Ampt modellen (Li & Michael, 2006).....	29
Figur 10: Forsknings- og demonstrasjonsanlegget på Risvolla	32
Figur 11: Dreneringsstein for vindsikring av takmattene.....	33
Figur 12: Takrutenes dimensjoner.....	33
Figur 13: Oppbygning av takrute A	34
Figur 14: Oppbygning av takrute B.....	35
Figur 15: Oppbygning av takrute C.....	35
Figur 16: Oppbygning av takrute D	36
Figur 17: Bilde av nedbør-, temperatur- og relativ luftfuktighetsmålere.....	36
Figur 18: Avrenningskurve av rådata fra takrute D ved en nedbørhendelse 25.juli 2014	44
Figur 19: Grafisk støyredusering med den matematiske funksjonen glidende gjennomsnitt ..	46
Figur 20: Støykriterienivå 0,20	48
Figur 21: Støykriterienivå 0,25	48
Figur 22: Støykriterienivå 0,40	48
Figur 23: Støykriterienivå 0,45	48
Figur 24: Støykriterienivå 0,55	48
Figur 25: Støykriterienivå 0,60	48
Figur 26_ Wavelet- og Fourier metoden for støyredusering (Chou, 2014)	49
Figur 27: Avrenningskurver for takrute B, C og D den 25.juli 2014	51
Figur 28: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 25.juli 2014	52
Figur 29: Avrenningskurver for takrute A, C og D 18.august 2014	54
Figur 30: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 18.august 2014	55
Figur 31: Avrenningskurver for takrute A, C og D 20.august 2014	57
Figur 32: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 20.august 2014	58
Figur 33: Avrenningskurver for de ulike takrutene i perioden 28.desember 2014 til 4.januar 2015	59
Figur 34: Lufttemperaturen gjennom perioden 28.desember 2014 til 4.januar 2015	60
Figur 35: Snømengde på taket før snøsmelting.....	61
Figur 36: Snømengde etter snøsmelting.....	61

Figur 37: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 28.desember 2014 til 4.januar 2015	61
Figur 38: Jordtemperaturen i de forskjellige takrutene 28.desember 2014 til 4.januar 2015...	62
Figur 39: Avrenningskurver for de ulike takrutene 8.februar til 10.februar 2015	63
Figur 40: a) Snømengde på taket før snøsmelting og b) snømengde etter snøsmelting.....	64
Figur 41: Lufttemperaturen i perioden 8.februar til 10.februar 2015.....	65
Figur 42: Jordtemperaturen for de ulike takrutene 8.februar til 10.februar 2015	65
Figur 43: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 8.februar til 10.februar 2015	66
Figur 44: Oppbygningen av RECARGA	69
Figur 45: Oppbygningen av RECARGA for simulering av avrenning fra grønne tak	70
Figur 46: Sammenligning av avrenningen fra observerte og simulerte data i RECARGA 25.juli 2014.....	71
Figur 47: Sammenligning av avrenningen fra observerte og simulerte data i RECARGA 17.august 2014	73
Figur 48: Sammenligning av avrenningen fra observerte og simulerte data i RECARGA 20.august 2014	74

Liste av tabeller

Tabell 1: Avrenning fra ulike takkonstruksjoner (VanWoert, et al., 2005)	10
Tabell 2: Ulike egenskaper forårsaket av en aldring av et ekstensivt grønt tak (Getter, et al., 2007).....	11
Tabell 3: Ulike parametere for forskjellige substrater (Dingman, 2008)	22
Tabell 4: Dimensjonene til oppsamlingskarene	37
Tabell 5: Dataloggerens overestimering av vannstandene i karene	38
Tabell 6: Vannstandsmålinger i oppsamlingskar for takrute A.....	41
Tabell 7: Vannstandsmålinger i oppsamlingskar for takrute B	41
Tabell 8: Vannstandsmålinger i oppsamlingskar for takrute A med omrøring.....	41
Tabell 9: Avrenningsresultater fra nedbørhendelsen 25.juli 2014	52
Tabell 10: Jordfuktighetsresultater 25.juli 2014.....	53
Tabell 11: Avrenningsresultater fra nedbørhendelsen 18.august 2014	55
Tabell 12: Jordfuktighetsresultater 18.august 2014	56
Tabell 13: Avrenningsresultater fra nedbørhendelsen 20.august 2014	57
Tabell 14: Jordfuktighetsresultater 20.august 2014	58
Tabell 15: Avrenningsresultater for de ulike takrutene 28.desember 2014 til 4.januar 2015 ..	60
Tabell 16: Jordfuktighetsresultater 28.desember 2014 til 4.januar 2015	62
Tabell 17: Avrenningsresultater for de ulike takrutene 8.februar til 10.februar 2015	64
Tabell 18: Jordtemperaturene til de ulike takrutene i perioden 8.februar til 10.februar 2015 ...	66
Tabell 19: Jordfuktighetsresultatene 8.februar til 10.februar 2015	67
Tabell 20: Den prosentlige reduseringen av nedbørmengdene fra de ulike takrutene gjennom prosjektets periode.....	68
Tabell 21: Avrenningsresultater med et støykriterium på 0,6.	72
Tabell 22: Avrenningsresultater med et støykriterium på 0,8	73
Tabell 23: Avrenningsresultater med et støykriterium på 0,8	75

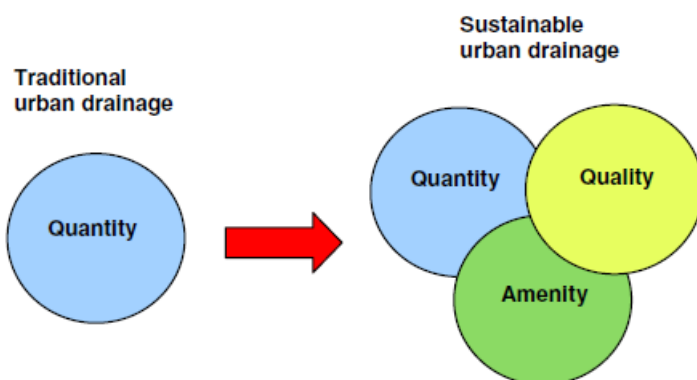
1 Innledning

I verden foregår det en økende urbanisering og en endring av klimaet. Den økte urbaniseringen fører til at andelen tette flater øker, den naturlige infiltrasjonen til grunnen reduseres og belastningen på avløpsnettene øker. I Norge har årsmiddeltemperaturen og nedbørmengdene økt i det siste århundret og det vil bli mer intens nedbør samt en stigning av havnivået (Regjeringen, 2013). Kombinasjonen av en økende urbanisering og klimaendringer skaper nye utfordringer med tanke på håndtering av overvann. For å møte disse utfordringene må det etableres gode overvannshåndteringer og da spesielt lokale overvannshåndteringer i urbane områder. Lokal overvannshåndtering er lokale tiltak man tar i bruk for å redusere mengden avrenning fra regn- og smeltevann (Thorolfsson, 2014). I motsetning til å lede overvannet direkte ut på ledningsnettene som det ble gjort tidligere, ønsker man nå å oppnå en fordrøyning og en reduksjon av overflateavrenningen. Grønne tak er et tiltak for håndtering av lokalt overvann og denne rapporten vil ta for seg ekstensive grønne tak som et LOD tiltak.

Våren 2014 ble det bygd et grønt tak på en MC-bod ved Risvollan borettslag i Trondheim. Taket er et forsknings- og demonstrasjonsanlegg som skal øke kunnskapen om hvordan grønne tak trives og fungerer i denne byen. Taket består av fire ulike typer ekstensive grønne tak med hver sin ulike oppbygning. Med dette vil denne masteroppgaven ta for seg en undersøkelse om hvor vidt bruken av grønne tak er et fornuftig LOD tiltak i forhold til reduksjon av flomtopper og overvannsmengder i et temperert klima for å unngå mulige oppdimensjoneringsproblemer av avløpsnettene og flom på bakkenivå. Dette vil innebære analyseringer og automatiseringer av data fra forskningsanlegget på Risvollan. I tillegg vil det bli utført ukentlige oppsyn ved forskningsanlegget der måleutstyret kontrolleres slik at det leveres gode data til analyseringsarbeidet.

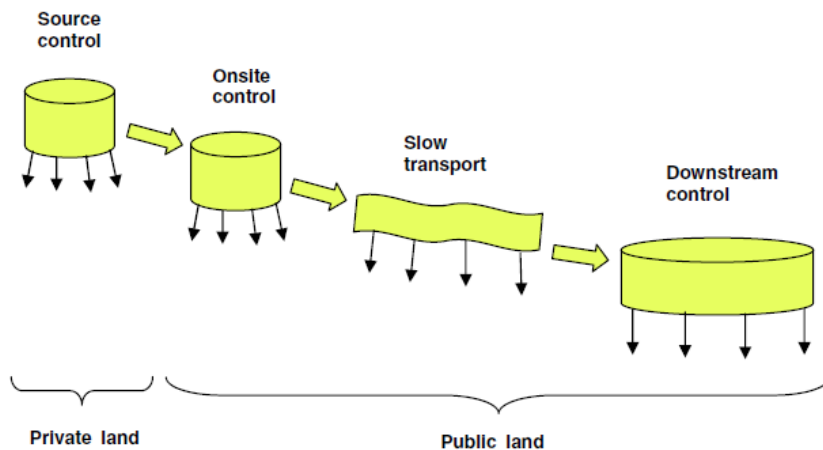
2 Overvannshåndtering

Overvann er regn eller smeltevann som renner av på terrengoverflaten. Overvannet kan renne av på overflater som veier, parkeringsplasser, tak med mer og kan gi utslipp og spredning av tungmetaller og mikroforurensninger i naturen. Tidligere var det vanlig å lede overvannet direkte til avløpsnettet og ut til nærmeste resipient. Dette gjør at det naturlige kretsløpet til vannet blir fjernet. Dette vil kunne by på problemer som redusert grunnvannstand der egenskapene til grunnen endres samt føre til oversvømmelser lenger ned i vassdraget (Thorolfsson, 2014). Med et endrende fremtidsklima og uten bruk av nødvendige tiltak, vil dette kunne føre til nødvendige oppdimensjonerings av avløpsrør, fare for flom og oversvømmelser i urbane områder. I nyere tid er det oppdaget ulike tiltak for håndteringen av overvannet og et nytt syn der man ser på overvannet som en ressurs. Disse tiltakene kalles lokal overvannshåndtering (LOH) eller også kalt lokal overvannsdiskonering (LOD). Lokal overvannsdiskonering er tiltak for å begrense avrenningen fra regn- og smeltevann fra urbane områder ved at man håndterer overvannet lokalt ved hjelp av infiltrasjon og fordrøyning (Sintef, 2012). Det finnes en rekke mulige overvannshåndteringstiltak og noen eksempler er: regnbed, lokale dammer, permeable dekker, vegeterte forsengkninger, infiltrasjonsgrøfter, grønne tak med mer. Formålet til disse anleggene vil være å redusere belastningen på avløpsnettet og mulige oversvømmelser, bedre vannkvaliteten til resipienten, være et miljøelement i lokalmiljøet og tilrettelegge for biologisk mangfold. (Thorolfsson, 2014). Ved korrekt utforming av disse anleggene vil overvannet være en ressurs og ikke et problem. Den nye tilnærmingen til håndtering av overvann i urbane strøk er vist i figur 1 der man går fra et tradisjonelt rørbasert system til et nyere mer bærekraftig system.



Figur 1: Overgangen fra et tradisjonelt rørbasert system til et mer bærekraftig system for håndtering av overvann (Stahre, 2005)

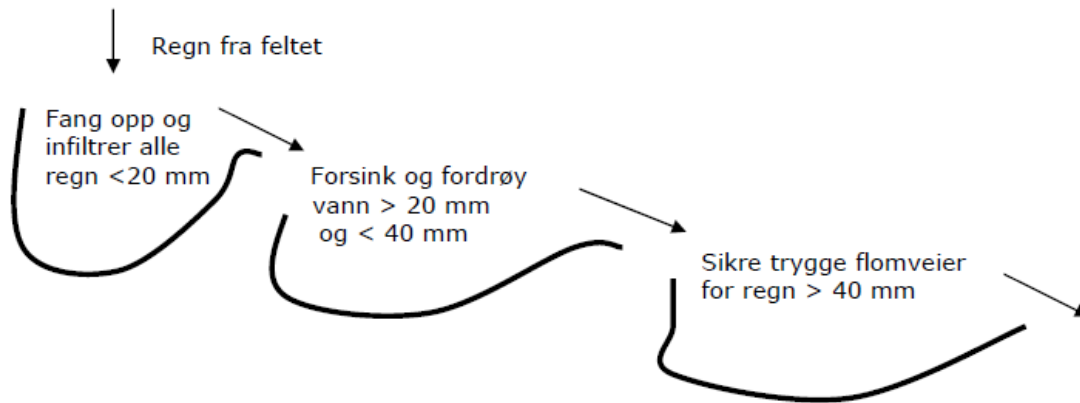
Det nye bærekraftige systemet inkluderer både transport av vann i rør, sikring av vannkvaliteten samt gjøre vannet til et estetisk miljøelement i lokalmiljøet. Dette innebærer bruken av åpne overvannsløsninger som benytter de samme prosessene som naturen selv bruker for håndtering av regnvann. Åpne overvannsløsninger kan deles i fire grupper: kildekontroll, område kontroll, sakte avrenningskontroll og nedstrøms kontroll (Stahre, 2005) som vist på figur 2.



Figur 2: Grupperinger av åpne overvannsløsninger (Stahre, 2005)

- Kildekontroll er bruken av mindre anlegg på privat grunn for håndtering av overvann. Eksempler på dette kan være grønne tak, regnbred, oppsamling av takvann, gruslagte innkjørsler med mer.
- Område kontroll omfatter flere små anlegg på offentlig grunn og er som regel kommunens ansvar. Dette kan være permeable dekker, åpne dammer, regnbred med mer.
- Sakte avrenningskontroll omfatter anlegg for videre transport og fordrøyning samt infiltrasjon av overvannet. Dette kan være infiltrasjonsgrøfter, kanaler, vegeterte forsenkninger med mer.
- Nedstrømskontroll består av større anlegg nedstrøms vassdraget for midlertidig fordrøyning av overvannet. Dette kan være store dammer, innsjøer, våtmarker med mer (Stahre, 2005).

Norsk vann har opprettet en treleddsstrategi for håndtering av nedbør og overvann. Den går ut på å fange opp og infiltrere alt regn mindre enn 20 mm, forsinke og fordrøye større regn > 20 mm og < 40 mm, og å sikre trygge flomveier for regn større enn 40 mm. Figur 3 viser et prinsipp av denne treleddsstrategien.



Figur 3: Norsk vanns treleddsstrategi (Lindholm, et al., 2008)

Som nevnt tidligere vil denne rapporten ta for seg bruken av ekstensive grønne tak som et LOD tiltak og grønne tak faller innenfor ledd en og to i treleddsstrategien. Det siste leddet i treleddsstrategien vil være å sikre trygge flomveier ved meget store nedbørhendelser der LOD tiltak ikke strekker til og vannet må føres videre. Slike nedbørhendelser er ofte av en størrelsesorden slik at det ikke vil være aktuelt eller lønnsomt å investere i LOD tiltak for å forhindre overflateavrenningen da disse tiltakene ville blitt meget kostbare.

I urbane områder med et kaldt klima oppstår det flere utfordringer som frost og isdannelse i åpne renner, kanaler, sluk og dammer, noe som gir gjentetting og oppstuvninger slik at vannet er tvunget til å gå en alternativ vei. Et kaldt klima vil redusere infiltrasjonen til grunnen, gi kortere vekstsesong for vegetasjon, gi en større avrenning ved regn og snøsmelting samt snødeponier i urbane strøk vil kunne avgi forurensninger når førstkommende avrenning inntreffer, også kalt «first flush». Et kaldt klima er absolutt noe man må ta hensyn til ved tilretteleggelse av lokale overvannstiltak.

3 Klimaendringer og urbanisering

Nedbørintensiteten forutsies å øke med 20 % til 60 % i perioden 2071 til 2100 enkelte steder i Norge i forhold til dagens korttidsregn. Havnivået vil stige med 15 til 25 cm enkelte steder innen 2050 og opp mot 70 cm innen 2100. Dette vil gi problemer for det eksisterende avløpsnett som en redusert kapasitet, oppstuvninger og økte overløpsutslipp (Lindholm, et al., 2008). Siden 1900 tallet og frem til i dag har det vært en stigning av årsmiddeltemperaturen på mellom 0,4 og 1,2 °C. Fra slutten av 1800 tallet og til i dag har det også vært en økning av den årlige nedbørmengden fra 5 % til 18 % avhengig av landsdel. Den største økningen er i Trøndelag, Nordland, Troms og Vest-Finnmark (RegClim, 2014). Den økte temperaturen vil føre til økte maksimumstemperaturer der tørkeperioder blir mer intensive og vinteren blir mildere. Andelen av fryse- og tineprosesser om vinteren vil øke og snøen vil smelte tidligere på året noe som bidrar til mer overvann når snø og is smelter (Sintef, 2012). Med dette vil det være viktig å ta hensyn til klimaendringer ved videre planlegging og dimensjonering av nye vann- og avløpsanlegg.

Den økende urbanisering er forårsaket av at flere personer bosetter seg i byene. Dette gjør at byene blir større og tettere fordi man ønsker å bygge byene så kompakte som mulig. I utviklingsland forventes det i 2030 at ca. 83 % av befolkningen vil bli boende i byer og urbane områder (Mentes, et al., 2005). En effekt av dette er at andelen impermeable overflater øker. Dette kan gi konsekvenser for infrastrukturen og omgivelsene til byene.

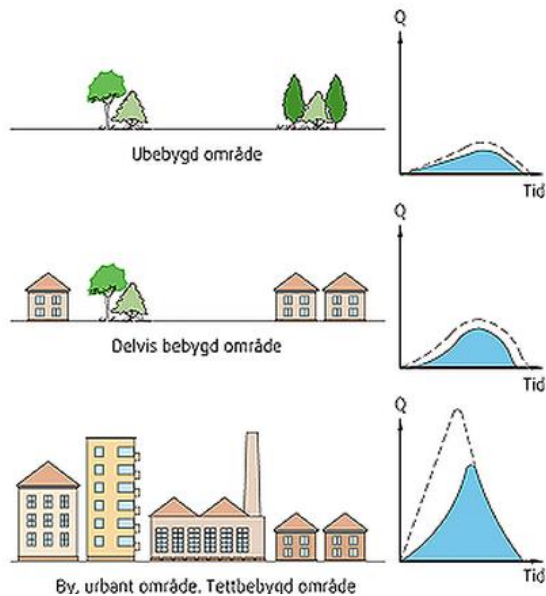
4 Urban hydrologi

Hydrologi er læren om vannets kretsløp, forekomst og fordeling på jorden samt vannets fysiske og kjemiske egenskaper i lokale eller globale områder. Vannets kretsløp innebærer fordampning, vannlagring, nedbør, snøsmelting, infiltrasjon og avrenning. Ved utbyggelse av urbane områder der andelen av impermeable overflater øker, vil den naturlige hydrologien påvirkes og man får et nytt begrep kalt urban hydrologi. Urban hydrologi tar for seg vannets kretsløp i urbane områder. Urbaniseringen byr på utfordringer da en økt andel av impermeable overflater vil redusere infiltrasjon til grunn og grøntområder fjernes slik at evapotranspirasjonen reduseres. Vannbalansen i et nedbørfelt er gitt ved (Dingman, 2008):

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

Der P er nedbøren, G_{inn} er grunnvannsavrøpning inn til feltet, Q er avrøpningen på overflaten, ET er evapotranspirasjonen, G_{ut} er grunnvannsavrøpning ut av feltet og ΔS er endring i

vannlagringen. Dette forteller oss at ved en gitt nedbørhendelse og med en reduksjon i både infiltrasjonskapasiteten og evapotranspirasjonen, vil avrenningen langs overflaten øke. Avrenning som foregår på impermeable overflater har en større avrenningshastighet enn naturlige overflater. Dette gjør at avrenningsvannet inntreffer og forsvinner hurtigere, og dermed øker avrenningstoppene samt erosjonen langs overflatene (Thorolfsson, 2014). Figur 4 viser hvordan en økende urbanisering påvirker avrenningen av overvann.



Figur 4: Urbaniseringens effekt på overflateavrenningen (Sintef, 2012)

Konsekvensene av økte avrenningstopper der både intensitet og volum øker, kan være oversvømmelser og forurensninger av overvannet (Butler & Davies, 2011). Med dette er urban hydrologi et grunnlag for etablering av bærekraftige LOD tiltak for gjenoppretting av det naturlige hydrologiske kretsløpet til vannet i urbane områder.

5 Grønne tak

Grønne tak er et tiltak for lokal overvannshåndtering i urbane strøk og havner innenfor gruppen kildekontroll for åpne overvannsløsninger i et bærekraftig urbant dreneringssystem. Det vil si at grønne tak kan være brukt på både småskala og større anlegg der overvannshåndteringen foregår på enten privat eller offentlig grunn og der den private har ansvar for drift av anlegget. Med tanke på håndtering av nedbørmengder og overvann, går grønne tak inn i ledd nr. 1 og 2 i Norsk Vanns treleddsstrategi som vist på figur 3 der hensikten er å fange opp og infiltrere alle regn mindre enn 20 mm samt forsinke og fordrøye regn i størrelsesorden 20-40 mm. Utviklingen av urbane områder bidrar til at andelen av impermeable overflater øker og det blir stor konkurranse om plassen. Dette gjør at tilrettelegging av ekstra arealer til bruk av nye bærekraftige lokale overvannshåndteringer blir både utfordrende og kostbart. Grønne tak skiller seg ut fra de andre LOD tiltakene ved at de kan bygges på et eksisterende takarealer uten å ta opp ekstra plass. Dette er en stor fordel med tanke på at omfanget av ubrukte takarealer kan tilsvare opp mot 50 % av den totale andelen impermeable overflater i urbane områder (Vanuytrecht, et al., 2013).

Grønne tak har mange fordeler og noen ulemper. Grønne tak kan (Berndtsson, 2009) (VanWoert, et al., 2005) (Braskerud, 2014):

- Gi en reduksjon og fordrøying av overvannsmengder og avrenningstopper. Dette reduserer sannsynligheten for oversvømmelser og overbelastninger av ledningsnettene samt forbedrer den bærekraftige urbane vannbalansen
- Være isolerende, redusere kostnader for både avkjøling og oppvarming av bygg samt redusere hetebølger i store og tette byer
- Være støydempende
- Gi en reduksjon av luftforurensninger
- Gjøre bymiljøet «grønnere», gi bedre opplevelser for innbyggerne samt tilretteleggelse for biologisk mangfold
- Forlenge takmembraners levetid
- Redusere snøras

Mulige ulemper er økte anleggskostnader, oppdimensjonering av takkonstruksjonen, behov for oppsyn og vedlikehold avhengig av typen grønne tak, endringer av vannkvaliteten og det kan oppstå utfordringer ved lekkasjer i taket da lekkasjene er mer krevende å finne (Braskerud, 2014).

5.1 Vannkvalitet fra grønne tak

Ved bruk av grønne tak kan vannkvaliteten fra det avrente overvannet endres. Nedbørvann blir ofte betraktet til å ikke være forurensende, men noen av hovedfaktorene som påvirker vannkvaliteten i avrenningen fra grønne tak er: sammensetningen av det grønne taket, type materialer brukt i substratet, dreneringsmaterialer og andre underliggende materialer er av betydning. Tykkelsen på substratlaget, type dreneringsløsning, brukte kjemikaler til for eksempel vedlikehold, vegetasjonstype, sesong, nedbørintensitet, vindretning med mer er også av betydning. Av forurensninger fra grønne tak er det tungmetaller, nitrogen og fosfor det er sett mest på (Berndtsson, 2009).

Fosforinnholdet i avrenningen fra grønne tak har sitt største omfang i den tidlige fasen og er forårsaket av tilførselen av næringsstoffer og eventuelt gjødsling. Fosforinnholdet avtar med alderen grunnet en utvikling av vegetasjonen og er gradvis redusert fra substratlaget gjennom nedbør og avrenning med tiden. Dette gjør at grønne tak bidrar med et økt fosforinnhold i den avrente vannkvaliteten i utviklingsperioden. Det er observert både en reduksjon og en økning i nitrogenkonsentrasjonen i det avrente vannet fra tidligere studier avhengig av typen grønne tak samt en økning av pH-verdier i det avrente vannet med tiden. Dette reduserer surhetsgraden til resipientene. Etter perioder med nedbørpophold og tørke, vil effekten «first flush» påvirke vannkvaliteten i det avrente vannet. Det grønne taket kan bli forurenset av atmosfæriske partikler og rusk som blader, fugleavføring med mer og dette vil bli ført ut med avrenningen med de største konsentrasjonene i starten av det nye regnet. Utgivelse av næringsstoffer har stor sammenheng mellom gjødslingen, gjødslingsproduktet og vedlikeholdsarbeidet på et grønt tak. Men etter som ekstensive grønne tak krever minimalt med vedlikehold, er ikke dette et stort problem (Berndtsson, 2009).

5.2 Oppbygning av grønne tak

Grønne tak består som regel av fire lag: et vegetasjonslag på toppen, et lag av jordsubstrat eller et annet vekstgrunnlag, et dreneringslag og et filterlag for å unngå blanding av jordmassene med dreneringslaget i bunn. Et beskyttelseslag kan brukes over takkonstruksjonen hvis man har intensive røtter med sterk vekst. Valg av type vegetasjon, sammensetning og tykkelse av jordsubstrat, varierer mellom produsentene. Avhengig av dybden på substratlaget kan grønne tak kategoriseres innenfor to hovedtyper: ekstensive og intensive grønne tak. I mellom disse finnes det også andre typer kalt semi-intensive grønne tak. Figur 5 viser et prinsipp av hvordan grønne tak er bygd opp med de ulike lagene samt hvordan dette kan sammenlignes med et bilde ut fra naturen. Intensive grønne tak kan ha

vegetasjon bestående av gress, busker, trær med mer og kan være store takhager. Tykkelsen på substratet er ofte tykkere enn 150 mm og de installeres på tak med takvinkler mindre enn 10° (Mentes, et al., 2005).

5.3 Ekstensive grønne tak

Ekstensive grønne tak er av den «lettere» typen og er som regel vedlikeholdsfrie, men kan kreve noe oppsyn spesielt i oppstartsfasen. De kan komme i prefabrikkerte vegetasjonsmattor som kan legges

direkte på taket eller tilsåes på taket ved at vekstmediet legges ut først (Berndtsson, 2009).

Ekstensive grønne tak kan deles inn i flere undergrupper: hele sedumtak eller andre tak med ulike blandinger av sedum, moser, urter og gress der sedum er den mest brukte plantetypen (Noreng, et al., 2012). Sedumarter er best egnet da klimaet og vekstforholdene på et tak er mer preget av vind og uttørking enn på bakkenivå (Sintef, 2013). Sedum er av bergknappfamilien og den består av sukkulenter som er meget tørketålige og med lite krav til jordsmonnet som et vekstgrunnlag. Arten har dermed også et lavt vedlikeholdsbehov.

Sukkulentene har lav vekst, tykke blader og blomstene kommer i flere farger: gul, hvit, rød og rosa (Vital vekst, 2011).

Jordsubstratlaget til ekstensive grønne tak kan bestå av mineraljord, lavagrus, pimpstein, lavagrus og kompost (Vital vekst, 2011), men det finnes også andre typer materialer som kan brukes til vekstgrunnlag. Oppbygningen av ekstensive grønne tak vil være avhengig av takets konstruksjon og takvinkel. Avhengig av takvinkelen kan det enten brukes et fuktbevarende sjikt eller et dreneringslag for å lede bort overflødig vann. For lavere takvinkler på 0° til 5° , bør det brukes et drenerende sjikt for å unngå at plantene drukner, men dette er også avhengig av væreforholdene og nedbørshistorikken på området. For større takvinkler kan man bruke et fuktbevarende sjikt som for eksempel knasteplater eller forskjellige filtduker som holder tilbake vann slik at det kan brukes senere igjen av planten ved tørkeperioder. Med dette kan den totale vekten av ekstensive grønne tak variere fra ca. 35kg/m^2 i tørr tilstand til opp mot ca. 130kg/m^2 i vannmettet tilstand (Noreng, et al., 2012). For meget skrå tak kan ekstensive grønne tak legges på takvinkler opp mot 45° (Mentes, et al., 2005), men da må mattene sikres mot vindavblåsning.



Figur 5: Oppbygning av grønne tak sammenlignet med naturen (Noreng, et al., 2012)

5.4 Faktorer som påvirker effekten til grønne tak

Grønne tak er utsatt for ulike klima og værforhold, de er anlagt på takkonstruksjoner med ulike oppbygninger og de grønne takene er satt sammen med ulike kombinasjoner av vegetasjonstype, jordsubstrat, tykkelse med mer. Alt dette er med på å påvirke egenskapene til grønne tak som et lokalt overvannshåndteringstiltak.

Substratets tykkelse og struktur er av stor betydning for avrenningsmengden fra det grønne taket. Et tak med et tykkere jordsubstrat og med et stort porevolum vil ha en større kapasitet til å redusere mengden avrenningen enn et tak med en mindre tykkelse (Berndtsson, 2009). Takets konstruksjon og helning vil kunne påvirke grønne tak da en økende helning på taket vil gi et mindre effektivt areal og det vil ta opp mindre plass, men avrenningen fra taket øker tilsvarende med helningen for normale nedbørtilfeller. Ved meget store nedbørtilfeller, ved 50- og 100 års gjentakintervaller, vil helningen på taket være av en mindre betydning (Getter, et al., 2007). Tak med en lavere vinkel vil kreve mer omfattende oppbygning av selve dreneringselementet og dette kan bidra til en økning av både egenvekten og den total tykkelse på det grønne taket. Et tak med en økt takvinkel gir automatisk mer drenering og unngår dette tillegget, men kan ha et behov for et fuktbevarende sjikt slik at plantene ikke tørker ut. En økt takvinkelen vil også redusere den positive effekten av tilbakeholdningen av nedbørvann man får ved en økt substrattykkelse (VanWoert, et al., 2005) og et eksempel av dette er vist i tabell 1. I tabell 1 er nedbørhendelsene delt opp i 3 klasser: lett(< 2 mm), middels(2-6 mm) og kraftig (> 6 mm) nedbør der avrenningen gitt i prosent er påvirket av ulike takkonstruksjoner.

Tabell 1: Avrenning fra ulike takkonstruksjoner (VanWoert, et al., 2005)

Konstruksjon	Lett nedbør	Middels nedbør	Kraftig nedbør	Gjennomsnitt
2 % og 2,5 cm	95,1 %	82,9 %	64,7 %	69,8 %
2 % og 4,0 cm	97,1 %	85,5 %	65,1 %	70,7 %
6,5 % og 4,0 cm	94,9 %	83,1 %	59,5 %	65,9 %
6,5 % og 6,0 cm	95,8 %	84,6 %	62,0 %	68,1 %

Fra tabell 1 ser man at ved å bruke et substratlag med tykkelsen 6,0 cm og med en takvinkel på 6,5 %, vil man i dette tilfellet tilbakeholde 62 % av nedbøren ved et kraftig regn(>6mm) noe som er lavere enn for et tak med substrattykkelse på kun 2,5 cm med takvinkelen 2 %. I et annet forsøk utført av Berndtsson (2009) ble det sett på forskjellen mellom et ekstensivt grønt tak med takvinklene 2 % og 14 %. Nedbørintensiteten var konstant på 1,3 mm/min. Det ble

påvist at det grønne taket med en takvinkel på kun 2 % holdt tilbake ca. dobbelt så mye av nedbørvannet enn taket med takvinkelen 14 %. En annen studie der man så på forskjellen mellom avrenningen fra grønne tak med takvinklene 2 %, 7 %, 15 % og 25 % utført av Getter, Rowe og Andresen (2007), viste at den gjennomsnittlige reduseringen av avrenningen var på ca. 76,4 % og 85,6 % for henholdsvis takvinklene 25 % og 2 %.

En plassering av taket i retningen der solen viser seg oftest gjennom året vil forbedre egenskapene til grønne tak da den totale tilførte energien til det grønne taket vil øke og fordampning og evapotranspirasjon vil dermed også øke. I den nordlige halvkule vil en plassering av takkonstruksjonen mot syd gi størst potensial for opptak av solenergi (Sintef, 2011). En plassering av grønne tak i områder med mye skygge fra tilstøtende bygninger med mer, vil redusere solinnstrålingen og den tilførte energien til taket.

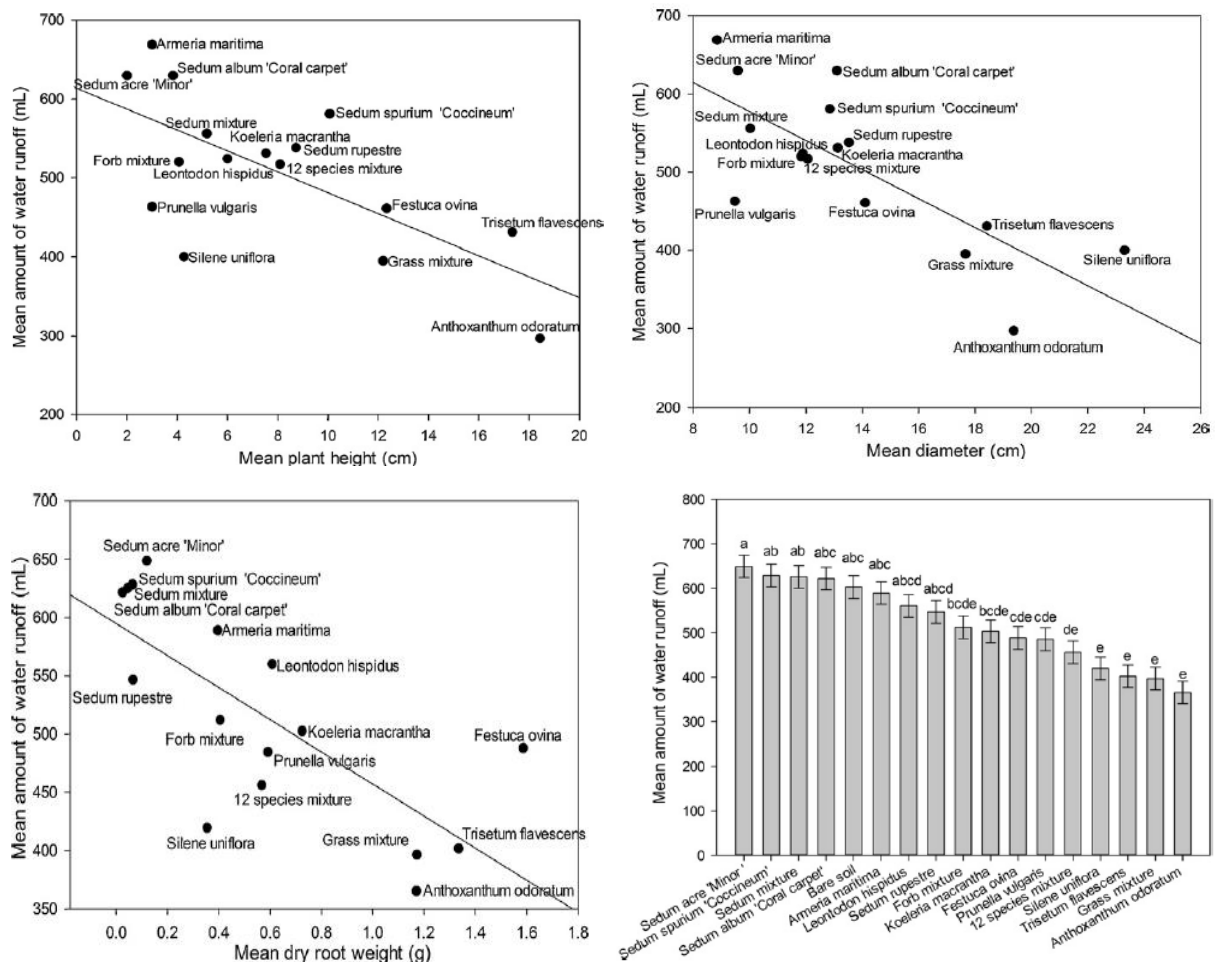
Med tiden vil det foregå en aldring av et grønt tak og det vil foregå kjemiske og fysiske forandringer. Forandringene kan være fra for eksempel tapte jordpartikler, oppløste stoffer vaskes ut, økt organisk innhold i substratet og endringer av porøsiteten gjennom komprimering og plantevekst (Berndtsson, 2009). En tidligere studie av Getter et al. (2007) så på endringer av fysiske egenskaper og andelen av organisk materiale i et 5 år gammelt ekstensivt grønt tak. Det ble observert en dobling av både organisk materiale og porøsitet i løpet av denne tiden. Dette førte til en økning av vannlagringsevnen i det grønne taket fra en tidligere verdi på 17 % til en senere verdi på 67 %. I tabell 2 er det vist de endringene som fant sted med tiden for et 5 år gammelt ekstensivt grønt tak. Fra tabellen ser man endringer av organisk materiell, porevolum, fritt luftvolum og kapasiteten for vannlagring etter 5 år for det grønne taket.

Tabell 2: Ulike egenskaper forårsaket av en aldring av et ekstensivt grønt tak (Getter, et al., 2007)

Prøvestykke	Organisk materiale	Porevolum	Fritt luftvolum	Vannholdende kapasitet
Nytt substrat	2,33 %	41,41 %	21,43 %	17,07 %
Modnet substrat	4,25 %	81,84 %	14,40 %	67,44 %

Vegetasjonsmengden og vegetasjonstypen på grønne tak er av betydning for redusering og tilbakeholdelse av avrenningen fra grønne tak. Effekten ved tilbakeholdelse av overvannet trer sterkest frem etter perioder med lite tilgang på vann og ved økte lufttemperaturer (Berndtsson, 2009). En tidligere studie utført av VanWoert et al. (2005) oppdaget en forskjell mellom to grønne tak der ett tak var dekket av vegetasjon og det andre taket bestod av kun jordsubstrat.

Begge takene var utsatt for like nedbørforhold men taket med vegetasjon holdt tilbake 60,6 % av nedbøren og taket med kun jordsubstrat holdt tilbake 50,4 % av nedbøren. Den strukturelle oppbygningen til vegetasjonen er også av betydning da en økning av plantenes lengde, stengelens diameter og røttenes egenvekt bidrar til å redusere avrenningen fra grønne tak (Nagase & Dunnett, 2011). Nagase og Dunnett (2011) påviste også en forskjell i den reduserte avrenningen fra grønne tak ved bruk av ulike vegetasjonstyper og dette er vist i figur 6.

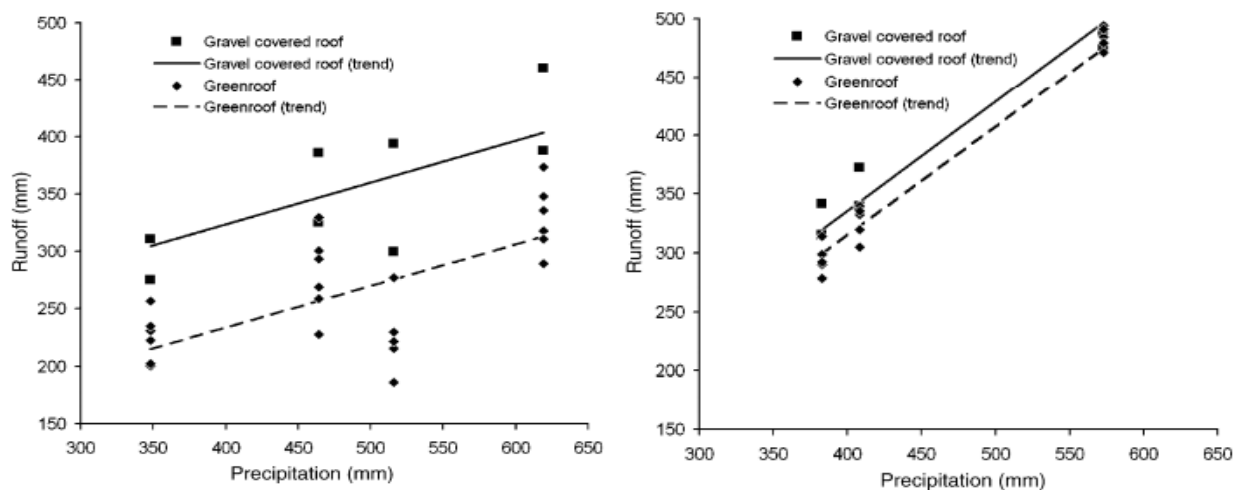


Figur 6: Sammenheng mellom valg av vegetasjon, plantenes strukturelle oppbygning og avrenning fra grønne tak (Nagase & Dunnett, 2011)

Det må velges riktig type vegetasjon til grønne tak ut fra vær og klimaforhold. I kjølige klima der regn står for mesteparten av nedbøren, vil det være en fordel å bruke en større andel prosent av vegetasjon som er mer aktivt under kalde sesonger og med en større vannlagringskapasitet. Dette kan være arter som moser, andre våtmarksplanter med mer. En

kombinasjon av vinteraktive moser med sommeraktive karplanter, vil være en løsning som kan redusere avrenningen effektivt fra et grønt tak over hele året (Schroll, et al., 2010). Som nevnt tidligere kan man bruke sukkulenter i varme sesonger med mye tørke da disse plantene har en høy motstand mot uttørking (Villarreal & Bengtsson, 2004).

Vegetasjonen på et grønt tak er sterkt påvirket av sesongen. I varmere perioder vil man få en økt evapotranspirasjon og den økte temperaturen vil tørke ut substratlaget raskt etter en nedbørhendelse, noe som fører til at plantenes egenskaper mot tilbakeholdning av nedbørvannet gjenopprettes raskt (Berndtsson, 2009). I kaldere perioder vil man få en økt avrenning fra grønne tak og dette skyldes en lavere evapotranspirasjon, ulik fordeling av nedbøren, endringer av jordsubstratet og plantenes egenskaper (Mentes, et al., 2005) (Farzaneh, et al., 2005). Figur 7 viser forskjellen mellom avrent vann fra grønne tak i både sommer- og vinterperioder.



Figur 7: a) Avrenning i en sommerperiode og b) avrenning i en vinterperiode (Mentes, et al., 2005)

Fra figur 7 ser man at i vinterperioden vil en økning av nedbørmengden føre til en større økning av den avrente vannmengden i forhold til avrenningen i en sommerperiode. En annen studie utført av Vanuytrecht et al. (2013) påviste at bruken av grønne tak på sommeren i et temperert klima reduserte avrenningen med 61 % til 75 % på sommeren og 6 % til 18 % på vinteren (Vanuytrecht, et al., 2013).

Ved ulike sesonger vil også nedbøren endre seg deretter. Nedbørens intensitet er av betydning for avrenningen fra grønne tak da det er en sammenheng mellom økt nedbørintensitet og en økende mengde avrenning fra grønne tak samt tiden før avrenning inntreffer reduseres (Villarreal & Bengtsson, 2004). Hvis nedbørintensiteten er stor nok og overskrider

infiltrasjonskapasiteten til jordsubstratet, vil nedbørmengden gå direkte til avrenning selv om jordsubstratet ikke er fullstendig mettet med vann (Dingman, 2008).

6 Hydrologiske prosesser forbundet med grønne tak

Nedbør som faller på grønne tak vil gå gjennom ulike prosesser før det blir til avrenning:

- regnvann kan bli liggende på jordoverflaten og fordampe eller renne direkte av
- plantene gir mulighet for intersepsjon der regnvann blir værende igjen på vegetasjonen og som senere fordamper
- vann infiltrerer ned i jordsubstratet der det blir absorbert inn i porene eller andre adsorberende materialer i vekstsubstratet
- vannet blir tatt opp av plantene, lagret i plantene og transpirert til atmosfæren
- nedbør som faller i form av snø kan bli liggende på taket og senere smelte

Når nedbørvannet har gått gjennom alle disse prosessene vil mengden overvann som renner av et grønt tak være gitt ved (Nagase & Dunnett, 2011):

Avrent vann = Nedbør – (intersepsjon av vann + vannretensjon + transpirasjon fra planter + fordampning fra jorda)

Mengden avrenning, størrelsen på avrenningstoppen og når avrenningstoppen inntreffer, vil være avhengig av alle de nevnte prosessene ovenfor samt klima og værforholdene. Nedbør som faller på grønne tak kan være enten som regn, snø eller en kombinasjon av begge.

6.1 Evapotranspirasjon

Evapotranspirasjon er et uttrykk for alle prosessene der vann i fast eller flytende form omdannes til vanddamp. Uttrykket inkluderer fordampning fra jordoverflater, vannoverflater og fordampning fra blader og planter(transpirasjon). Fordampning er alltid ledsaget av latent varmeoverføring fra fordampningsobjektet og ut i luften. Varmetapet fører til en redusert overflatetemperatur på objektet, men dette kan bli kompensert av varmeoverføring innenfra objektet, stråling eller andre varmeoverføringer fra den overliggende luften. Energibalansen for fordampning av et legeme over et tidspunkt er gitt ved (Dingman, 2008):

$$LE = K + L - G - G + A_w - \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Der LE er fordampningen, K er netto innkommende kortbølget stråling, L er netto innkommende langbølget stråling, G er netto utgående energi grunnet konduksjon til grunnen, H er netto utgående varme til atmosfæren, A_w er netto energi forårsaket av tilførsel og

redusering av vann, og ΔQ er endringen av den lagrede varmen i objektet pr. m^2 i løpet av det gitte tidsrommet.

Fordampning fra åpne jordoverflater forekommer i to atskillende stadier. I det første stadiet er fordampningsraten sterkt påvirket av energibalansen på overflaten samt vind- og fuktighetsforhold. Denne fordampningen er derimot uavhengig av vanninnholdet i jordsubstratet og fordampningsraten er tilnærmet lik fordampning fra et fritt vannspeil. Fordampningen fra et fritt vannspeil er gitt ved (Dingman, 2008):

$$E = \frac{\Delta \cdot (K+L) + \gamma \cdot K_E \cdot \rho_w \cdot \lambda_v \cdot v_a \cdot e^*_a \cdot (1-W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v \cdot (\Delta + \gamma)} \quad (2.2)$$

Der E er fordampningsraten (mm/dag), e^*_a er det mettede vanndamptrykket i luften (kPa), v_a er vindhastigheten (m/s), W_a er den relative fuktigheten (forholdet mellom vanndampmengden i luften og den maksimale vanndampmengden som luften kan inneholde i mettet tilstand), λ_v er latent varme ved fordampning (MJ/kg), ρ_w er tettheten til vann (kg/m^3), Δ er forholdet mellom det mettede vanndamptrykket og den gitte temperaturen (kPa/K), K_E er forholdet mellom virkelig fordampning og potensiell fordampning, og γ er en konstant som relaterer det delvise trykket av vannet i luften til lufttemperaturen (kPa/°C).

Forholdet mellom det mettede vanndamptrykket og den gitte temperaturen, Δ er gitt ved:

$$\Delta = \frac{2508,3}{(T+237,2)^2} \cdot \left(\frac{17,3 \cdot T}{T+237,3} \right) \quad (2.3)$$

Der T er temperaturen i grader Celsius. Den latente varmen ved fordampning er gitt ved:

$$\lambda_v = 2,50 - 2,36 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (2.4)$$

γ kalt «the psychrometric constant» er gitt ved:

$$\gamma = \frac{C_a \cdot P}{0,622 \cdot \lambda_v} \quad (2.5)$$

Alle andre verdier er oppslagsverdier eller verdier som må måles ute i feltet.

I det andre stadiet er fordampningen bestemt av hvor hurtig vann kan føres fra substratet og til overflaten i forhold til et minkende vanninnhold fra overflaten og nedover i jordsubstratet.

Fordampningen i dette stadiet foregår mer langsomt enn den førstnevnte

fordampningsprosessen. Fordampningen fra jordsubstratet i dette stadiet er gitt ved (Dingman, 2008):

$$E_2(t) = \frac{8}{\pi^{1/2}} \cdot E_{-1} \cdot \frac{t_1}{t} = 0,811 \cdot \frac{F_1}{t} \quad t \geq t_1 \quad (2.6)$$

Der E_2 er fordampningsraten i det andre stadiet(mm/dag), E_{-1} er den gjennomsnittlige fordampningen i det første stadiet(mm/dag), t_1 er fordampningsvarigheten i det første stadiet(dager), F_1 er den totale fordampningen i det første stadiet(mm) og t er varigheten på fordampningen i det andre stadiet(dager).

Transpirasjon er fordampning av vann gjennom planter og ut i atmosfæren. Vann i jordsubstratet absorberes av plantenes røtter, vannet transporteres gjennom planten og ut til bladene der det diffunderer ut gjennom spalteåpningene. Mengden vann som transpireres på et område vil være avhengig av plantetypen, andelen av planter og bladareal indeksen. Bladareal indeksen er definert som det totale arealet av blader over bakkenivå i forhold til grunnarealet. Det vil si man summerer opp alle bladene i et vegetert område og forestiller seg dette som et stort teppe over hele grunnarealet. For eksempel vil LAI = 3 bety at området har nok blader til å dekke hele grunnarealet i 3 lag med blader. LAI varierer fra sesong til sesong og fra område til område. Raten av vann som kan transpireres gjennom bladene for et bestemt område er gitt ved:

$$C_{can} = f_s \cdot LAI \cdot C_{leaf} \quad (2.7)$$

Der C_{can} er transpirasjonsraten for et gitt område(mm/s), f_s er dekningskoeffisient som tar hensyn til at noen blader er dekket mot sollys og vind, LAI er bladareal indeksen for området og C_{leaf} er den maksimale transpirasjonsverdien for ulike vegetasjonsdekkede områder(mm/s). Man finner disse verdiene ved å utføre feltforsøk og tester på det aktuelle området eller bruker tabellverk for lignende områder.

Med dette kan man med en modifisering av ligning (2.2) få en ligning for evapotranspirasjonen fra et område gitt ved (Dingman, 2008):

$$ET = \frac{\Delta \cdot (K+L) + \rho_a \cdot c_a \cdot C_{at} \cdot e^*_a \cdot (1-W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v \cdot [\Delta + \gamma \cdot (1 + C_{at} / C_{can})]} \quad (2.8)$$

Der ρ_a er tettheten til luft(kg/m³), C_{at} er den atmosfæriske ledningsevnen for vanndamp(mm/dag), C_a er varmekapasiteten til luft(MJ/kg K) og de andre symbolene er som nevnt tidligere for ligning (2.2).

6.2 Intersepsjon

Intersepsjon er prosessen der nedbør faller på vegeterte områder og blir liggende igjen på greiner, blader med mer og som senere fordamper. Graden av intersepsjon er i sterk grad påvirket av plantetypen, planteutviklingen, LAI, samt intensiteten, varigheten og formen på nedbøren. I praksis er det vanskelig å gi nøyaktige beregninger av intersepsjonen da det er store variasjoner mellom de påvirkende faktorene. Aston (1979) antok et eksponentielt forhold mellom intersepsjonen og nedbøren gitt ved (De Jong & Jetten, 2007):

$$I = C_p \cdot S_{\max} (1 - e^{-kP/S_{\max}}) \quad (3.1)$$

Der I er den kumulative intersepsjonsmengden(mm), P er den kumulative nedbørsmengden(mm), k er en korreksjonsfaktor for vegetasjonens åpenhet, C_p er en gjennomsnittlig dekningsgrad av vegetasjon på området og S_{\max} er vegetasjonens lagringskapasitet(mm). Dette er faktorer som må måles og testes ute i det enkelte felt for å få de mest nøyaktige resultatene, men man kan også bruke andre estimerte verdier. Faktoren k er påvirket av bladareal indeksen og ut fra flere tester fant Aston (1979) følgende sammenheng mellom k og LAI:

$$k = 0,065 \cdot LAI \quad (3.2)$$

6.3 Jordsubstratets sammensetning

Jordsubstratet i et ekstensivt grønt tak vil være sammensatt ulikt avhengig av produsent og i noen tilfeller vil det være gjengroing av røtter fra vegetasjonen. Dette gjør at substratet vil være en blanding av ulike jordarter, planter og andre materialer. Videre ses det bort fra organisk materiell og substratet betegnes som et system bestående av mineralkorn, vann og luft. Størrelsene på porene som kan lagre vann er tilnærmet lik kornstørrelsen til mineraljorden og fordelingen av porene er bestemt av forløpet til jordsubstratets kornfordelingskurve.

Den tørre tettheten til et jordsubstrat er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\rho_b = \frac{M_m}{V_s} = \frac{M_m}{V_a + V_w + V_m} \quad (4.1)$$

Der ρ_b er den tørre tettheten til jordsubstratet(kg/m^3), M_m er den tørre massen til jordsubstratet(kg), V_s er det totale volumet til substratet(m^3), V_a er luftvolumet, V_w er vannvolumet og V_m er volumet av mineralkomponentene (m^3). En hydrologisk utfordring vil være at tettheten øker ved økende dybde i jordsubstratet da overliggende jord pakker sammen

underliggende jord. En økt tetthet vil gi en minkende porøsitet.

Porøsitet er et mål på hvor mye porevolum man har totalt i et materiale og et tilgjengelig volum for lagring av både luft og vann. Porøsiteten til et jordsubstrat er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\phi = \frac{V_a + V_w}{V_s} \quad (4.2)$$

Der ϕ er porøsiteten til et materiale (cm^3/cm^3), V_a er volumet av luft, V_w er vannvolumet og V_s er det totale volumet til substratet (m^3). Porøsiteten minker også med dybden da det foregår en komprimering fra overliggende lag og en utvikling av makroporer grunnet biologisk aktivitet nær overflaten. Generelt har finkornet jord mer porøsitet enn grovkornet jord og substrater med en stor andel organisk materiale kan ha porøsiteter opp mot 0.80 (Dingman, 2008). I et jordsubstrat vil det være et vanninnhold som kan variere med tiden og som er avhengig av forholdene rundt. Det volumetriske vanninnholdet er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (4.3)$$

Der θ er det volumetriske vanninnholdet (cm^3/cm^3), V_w er vannvolumet (m^3) og V_s er det totale volumet til hele jordsubstratet (m^3). Vanninnholdet kan beregnes ved å veie et prøvestykke med et kjent volum, ovenstørke den ved 105°C , veie prøvestykket på nytt etter tørking og gjennomføre en utregning med ligningen (Dingman, 2008):

$$\theta = \frac{M_{swet} - M_{sdry}}{\rho_w \cdot V_s} \quad (4.4)$$

Der M_{swet} er den våte vekten til prøvestykket (kg), M_{sdry} er den tørre vekten til prøvestykket (kg) etter tørking, ρ_w er tettheten til vann (kg/m^3) og V_s er det totale volumet til prøvestykket før tørking.

6.4 Vannlagring i jordsubstrat

Metningsgraden er andelen av porer som inneholder vann. Den forteller i hvilken grad substratet er mettet. Metningsgraden er gitt ved (Dingman, 2008):

$$S = \frac{\theta}{\varphi} \quad (5.1)$$

For grønne tak er substratets tykkelse av betydning da dette kan lagre mer vann. Den totale mengden av vann som kan lagres i et homogent jordlag er uttrykt med en dybde som kan beregnes ved å multiplisere det volumetriske vanninnholdet med tykkelsen på jordlaget:

$$\text{Vannlagringskapasitet} = \theta \cdot \text{tykkelsen på jordlaget} \quad (5.2)$$

Men etter som grønne tak kan ha substratlag av inhomogen blanding av ulike materialer samt gjengroing av røtter, er denne formelen kun en forenkling og et eksempel på hvordan vannlagring kan opptre i et homogent jordsubstrat.

6.5 Avrenning av vann i jord

I umettede porøse medier som jord vil det foregå en infiltrasjon samt en redistribusjon av vannet, en bevegelse av vannet gjennom jordsubstratet. Vann som infiltrerer i et umettet jordsubstrat vil bli påvirket av både kapillære trykkrefter og gravitasjonskrefter. Dette gjør at vannet beveger seg både vertikalt og horisontalt i substratet. I følge Darcy's lov er volumetrisk avrenning i x-retning beskrevet ved (Dingman, 2008):

$$q_x = -K_h \cdot \frac{d(z + \frac{p}{\gamma_w})}{dx} = -K_h \cdot \left[\frac{dz}{dx} + \frac{d(\frac{p}{\gamma_w})}{dx} \right] \quad (5.1)$$

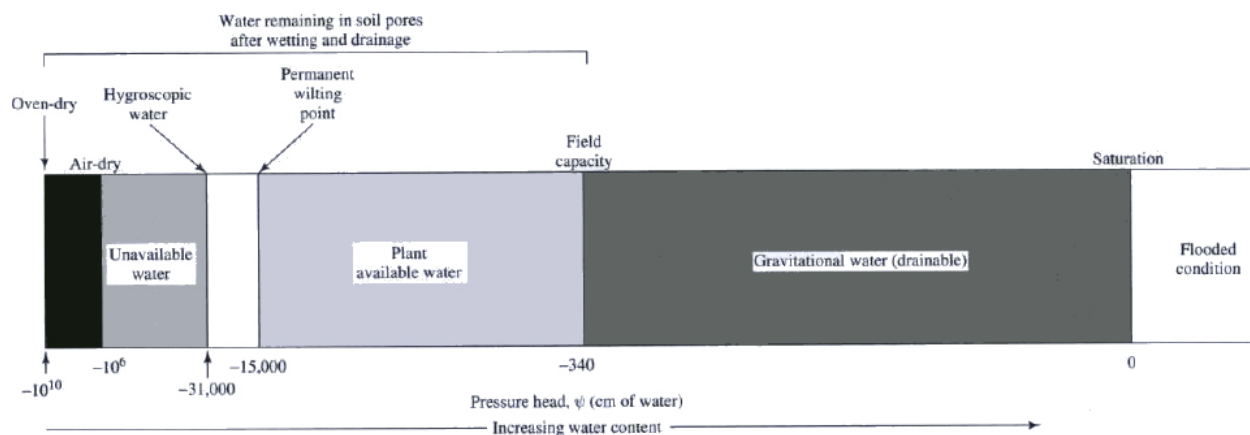
Der q_x er den volumetriske avrenningen i x-retning ($m^3/(s \cdot m^2)$), z er høyden over et vilkårlig datum (m), p er vanntrykket (N/m^2), γ_w er vektettheten til vann (N/m^3) og K_h er den hydrauliske konduktiviteten til mediet (m/s). Vannføringen i mediet skjer i respons av gradienter med mekanisk potensiell energi, der komponentene er gravitasjonens potensielle energi og trykkets potensielle energi. Fra ligning (5.1) er $\frac{dz}{dx}$ gradienten til gravitasjonens potensielle energi pr. vektenhet av bevegende vann og $\frac{d(\frac{p}{\gamma_w})}{dx}$ er gradienten til trykkets potensielle energi pr. vektenhet av bevegende vann.

Bevegelse av vannet i den vertikale retningen z , er beskrevet ved (Dingman, 2008):

$$q_z = -K_h \cdot \frac{d(z + \frac{p}{\gamma_w})}{dz} = -K_h \cdot \left[\frac{dz}{dz} + \frac{d(\frac{p}{\gamma_w})}{dz} \right] = -K_h \cdot \left[1 + \frac{d(\frac{p}{\gamma_w})}{dz} \right] \quad (5.2)$$

6.6 Vannets bruksområde og status i jord

Når et jordsubstrat er mettet og drenering skjer uten påvirkning fra fordampning, vannopptak fra planter, eller kapillær stigning, vil vanninnholdet minke i «uendelig» tid på en eksponentiell måte. Dreneringsraten minker eksponentielt og blir som regel neglisjerbart i løpet av noen dager. Dette inntreffer når dreneringsraten når feltkapasiteten. Feltkapasiteten betegnes som den vannmengden jordsubstratet kan tilbakeholde mot gravitasjonskreftene over tid der dreneringsraten etter dette er så lav at den kan anses som neglisjerbar. Vannmengden i dette feltet må fjernes ved evapotranspirasjon (Dingman, 2008). En illustrasjon som viser en klassifisering av vannstatuser i jord er vist i figur 8.



Figur 8: Vannstatus i et jordlag (Dingman, 2008)

Figur 8 viser hva vannmengder ved et gitt trykkhode kan brukes til. Fra figur 8 ser man at et trykkhode ved feltkapasiteten er på -340 cm. Alt vann over feltkapasiteten er drenerbart ved hjelp av gravitasjonskreftene. Tilgjengelig vann for planteopptak er gitt med et trykkhode fra og med -340 cm og ned til en grense på -15 000 cm. Vann med et trykk mindre en dette vil ikke kunne tas opp av planter og dette punktet er benevnt som visnepunktet. Vann i dette området kan kun fjernes ved fordampning og naturlig tørking over tid.

Feltkapasiteten til et jordsubstrat er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\theta_{fc} = \phi \cdot \left(\frac{|\psi_{ae}|}{340} \right)^{1/b} \quad (5.3)$$

Der θ_{fc} er feltkapasiteten, ϕ er porøsiteten (cm^3/cm^3), ψ_{ae} er luftpenetreringsspenningen (cm), b er en eksponent som beskriver fuktighetskarakteristikken og 340 er trykkhodet (cm) som vanninnholdet i substratet korresponderer til ved feltkapasitetspunktet. Avhengig av typen jordsubstrat kan disse verdiene finnes i tabell 3.

Evapotranspirasjon skjer ved fordampning og planteopptak, men planter har en begrenset sugsevne som nevnt tidligere på omtrent -1470 kPa (-15 000 cm). Når vanninnholdet blir redusert til en lavere verdi enn et trykkhode på -15 000 cm, vil plantene visne da de ikke klarer å ta opp dette vannet. Visningspunktet er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\theta_{pwp} = \phi \cdot \left(\frac{|\psi_{ae}|}{15000} \right)^{1/b} \quad (5.4)$$

Forskjellen mellom feltkapasiteten og visnepunktet betegnes som vannmengden tilgjengelig for planteopptak. Det tilgjengelige vanninnholdet for planteopptak er vist som i figur 8 ovenfor og er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\theta_a = \theta_{fc} - \theta_{pwp} \quad (5.5)$$

Tabell 3: Ulike parametere for forskjellige substrater (Dingman, 2008)

Jordtype	ϕ	K_h^* (cm/s)	ψ (cm)	b
Sand	0,395	1.76×10^{-2}	12,1	4,05
Leirjorda sand	0,410	1.56×10^{-2}	9,0	4,38
Sandig leirjord	0,435	3.47×10^{-3}	21,8	4,90
Siltig leirjord	0,485	7.20×10^{-4}	78,6	5,30
Leirjord	0,451	6.95×10^{-4}	47,8	5,39
Sandig leirjord	0,420	6.30×10^{-4}	29,9	7,12
Siltig leirjord	0,477	1.70×10^{-4}	35,6	7,75
Leirete leirjord	0,476	2.45×10^{-4}	63,0	8,52
Sandig leire	0,426	2.17×10^{-4}	15,3	10,4
Siltig leire	0,492	1.03×10^{-4}	49,0	10,4
Leire	0,482	1.28×10^{-4}	40,5	11,4

6.7 Infiltrasjon

Infiltrasjon er bevegelsen av vann fra overflaten og ned i jorden der den fordeler seg. Ved en nedbørhendelse vil infiltrasjonsraten endres med tiden der den er størst tidligst i prosessen og gradvis reduseres med tiden til en konstant verdi avhengig av egenskapene til jordsubstratet.

Infiltrering av vann i jord kan oppstå på 3 forskjellige måter (Dingman, 2008):

- 1) Ingen gropmagasinerings på overflaten:

$$H(t) = 0, f(t) = w(t) \leq f^*(t) \quad (6.1)$$

Der $H(t)$ er høyden av vann som samles på overflaten(mm), i dette tilfelle lik 0, $f(t)$ er infiltrasjonsraten(mm/min), $w(t)$ er vanntilførselsraten eller nedbørintensiteten (mm/min) og $f^*(t)$ er infiltrasjonskapasiteten(mm/min). I dette tilfellet infiltrerer vannet med lik intensitet som nedbøren da nedbøren underskrider den maksimale infiltreringskapasiteten.

- 2) Metning ovenfra:

$$H(t) > 0, f(t) = f^*(t) \leq w(t) \quad (6.2)$$

I denne situasjonen overstiger nedbørintensiteten den maksimale infiltrasjonsraten og infiltrasjonsraten blir dermed lik den maksimale. Vann samles på overflaten og det oppstår gropmagasinerings som kan føre til videre overflateavrenning.

- 3) Metning nedenfra:

$$H(t) \geq 0, f(t) = 0 \quad (6.3)$$

I dette tilfellet er det ingen vanntilførsel ovenfra, men jordsubstratet mettes nedenfra da grunnvannstanden stiger oppover slik at hele substratet blir mettet. Slike hendelser oppstår når grunnvann tilføres fra høyereliggende områder i vassdraget og grunnvannet stiger i de nedre områdene.

En enkel beregning av infiltrasjonskapasiteten til et jordsubstrat i kontrollerte forsøk er gitt ved (Dingman, 2008):

$$f(t) = w - q(t) \quad (6.4)$$

Der w er en kjent og konstant vanntilførsel (mm/min), og $q(t)$ er overflateavrenningen (mm/min). Vann tilføres enten med en gitt intensitet eller mengde til avrenningen inntreffer og dermed kan den gjennomsnittlige infiltrasjonskapasiteten til substratet beregnes ved å trekke fra det avrente vannet i forhold til den totale tilførte vannmengden.

6.7.1 Faktorer som påvirker infiltreringen

Infiltreringsraten er en funksjon av tiden og den kan påvirkes av en rekke faktorer som nedbørintensiteten og dybden av gropmagasineringsen på overflaten, den mettede hydrauliske konduktiviteten til jordsubstratet og jordoverflaten, i hvilken grad porevolumet er fylt med vann i det nedbørhendelsen inntreffer, helningen og ruheten på terrengoverflaten samt kjemiske og fysiske egenskaper til terrengoverflaten, substratlaget og nedbørvannet.

Terrengoverflaten kan være både kompakt og porøst avhengig av bruk og den kan bestå av vegetasjon, noe som vil øke andelen av åpninger og dermed gi overflaten en høy hydraulisk konduktivitet slik at vann infiltrerer med mindre motstand. Vegetasjonen på overflaten kan også ha en kjemisk sammensetting som påvirker infiltrasjonen ved at overflaten blir vannavstøtende. Ved lavere temperaturer kan det oppstå frost på overflaten og overflaten blir tilnærmet impermeabel. Men hvis jordsubstratet har et lavt vanninnhold ved frysning og det senere inntreffer en tineperiode, kan det dannes et nettverk av sprekker på overflaten som øker infiltreringen av smeltevann på våren. Egenskapene til jordsubstratet vil være avhengig av sammensetningen, porevolumet, porestørrelsene og fordelingen av disse. Menneskelig aktivitet er av betydning for porøsiteten av jordsubstratet da gange på materialet vil gi en komprimering og en redusering av porestørrelsene, noe som reduserer infiltrasjonen. En tett overflate vil gi større mulighet for vannsamling på overflaten og når denne vannstanden stiger til en viss verdi der den hydrauliske motstanden langs overflaten overstiges, opptrer avrenning på overflaten. Avrenningen er turbulent, den øker med en økende helning og avtar med en økende ruhet på terrenget. Et annet tilfelle vil være når nedbørintensiteten overstiger infiltrasjonskapasiteten og dermed vil overflateavrenning opptre før jordsubstratet er mettet. Nedbør påvirker jordsubstratet i den grad at overflaten blir mer kompakt og tett når porene

fylles med vann samt tyngdekraftene og den kinetiske energien til regnet vil kunne føre til en redusering av infiltrasjonen (Dingman, 2008).

6.8 Beregning av infiltrering

Det finnes en rekke metoder og ligninger for beregning av infiltrering gjennom ulike medier. Richard's ligning er en kombinasjon av Darcy's lov for vertikal bevegelse i et umettet medium og med bevaringen av masse. Dette er den grunnleggende formelen for infiltrasjon i et homogent og porøst medium. Metoden er en forenkling da jordsubstrater er ofte inhomogent, men for et medium bestående av flere lag, deler man opp lagene og bruker ligningen til hvert følgende lag. I følge tester får man god overenstemmelse mellom den numeriske løsningen av Richard's ligning og feltmålinger. Richard's ligning er gitt ved (Dingman, 2008):

$$-\frac{\partial K_h(\theta)}{\partial z'} + \frac{\partial}{\partial z'} \cdot \left[K_h(\theta) \cdot \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z'} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7.1)$$

Der θ er vanninnholdet, t er tiden(s), z' er den vertikale retningen på vannføringen, K_h er den hydrauliske konduktiviteten til et medium(mm/s) og ψ er trykkhodet(mm).

Numeriske løsninger har vanskelig for å gi god oversikt over i hvilken grad ulike faktorer påvirker infiltreringen og de er generelt beregningsmessig krevende. Med dette har det blitt gjort forsøk på å utvikle omtrentlige analytiske løsninger for Richard's ligning med tanke på infiltrering og den første metoden som ble utviklet er formulert ved (Dingman, 2008):

$$f(t) = \frac{Sp}{2} \cdot t^{-1/2} + K_p \quad (7.2)$$

Der $f(t)$ er infiltrasjonsraten(mm/s), S_p er sorpsjonen $\left(\frac{mm}{s^{-1/2}}\right)$, et mål på i hvilken rate vann trekkes ned i et umettet substrat ved kun av kapillarkrefter, t er tidssteget(s) og K_p er den hydrauliske konduktiviteten(mm/s). Ved å integrere denne formelen med hensyn på tid, får man den kumulative infiltreringen gitt ved:

$$F(t) = \frac{Sp}{2} \cdot t^{1/2} + K_p \cdot t \quad (7.3)$$

Ligning (7.3) har noen begrensninger:

- den gjelder kun for forhold med gropmagasinering og ikke for hendelser der infiltrering foregår før gropmagasinering inntreffer
- $f(0) \rightarrow \infty$, ved tids steg 0 har man uendelig infiltrering
- den krever informasjon av parametere for jordmediet som vanligvis ikke er kjent

6.8.1 Green Ampt modellen

En annen metode som gir et mer informativt syn på infiltreringsprosessen er kalt Green Ampt modellen. I likhet med Richard's ligning, bruker også Green Ampt modellen Darcy's lov og prinsippet om bevaring av masse. Tester og resultater viser at denne metoden er godt egnet for beregning av infiltrasjon i jordmedier og som en erstatning av Richard's metode.

Infiltreringsprosesser er ofte basert på empiriske studier da beskrivelse av infiltrasjonen i et inhomogent medium er meget komplekst da sammensetningene og de fysiske og de kjemiske egenskapene til et jordsubstrat er varierende, noe som også bringer med seg en del usikkerheter. Green Ampt modellen er en forenklet metode for beregning av infiltrasjon i et homogent medium. Metoden reduserer behovet for parametere, den tar kun for seg bevegelse av vann i den vertikale retningen for horisontale overflater uten helning og den antar en konstant vannfront som infiltrerer ned i substratet med en momentan skiftning fra delvis mettet substrat til fullstendig metning avhengig av om man befinner seg under eller over den våte fronten. I et virkelig tilfelle vil denne metningen foregå gradvis og ikke momentant.

Green Ampt ligningen er gitt ved (Dingman, 2008):

$$f(t) = f^*(t) = K_h^* \cdot \left[1 + \frac{|\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)}{F(t)} \right], \quad t_p \leq t \leq t_w \quad (7.4)$$

Der $f(t)$ er infiltrasjonsraten(mm/s), $f^*(t)$ er den maksimale infiltrasjonskapasiteten(mm/s), K_h^* er den mettede hydrauliske konduktiviteten til mediet(mm/s), ψ_f er den effektive spenningen på den våte fronten(mm), $F(t)$ er den totale mengden infiltrert vann(mm), φ er porøsiteten(cm^3/cm^3), θ_0 er vanninnholdet i mediet ved starten av hendelsen(cm^3/cm^3), t_p er tiden ved gropmagasinering(s) der overflaten er mettet og t_w er varigheten på nedbøren(s). Ligning (7.4) gir en mulighet for beregning av infiltrasjonsraten som funksjon av den totale infiltrerte vannmengden, $F(t)$.

Forholdet mellom infiltrasjonsraten og den totale mengden infiltrert vann i løpet av tiden t , er gitt ved (Dingman, 2008):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (7.5)$$

Med dette er ligning (7.4) en differensialligning som kan løses med hensyn på t som en funksjon av $F(t)$ der $F(t) > F(t_p)$:

$$t = \frac{F(t) - F(t_p)}{K_h^*} + \left[\frac{|\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)}{K_h^*} \right] \cdot \ln \left[\frac{F(t_p) + |\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)}{F(t) + |\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)} \right] + t_p \quad (7.6)$$

Fra ligning (7.4) og (7.6) kan man ikke finne en løsning som gir $F(t)$ som en eksplisitt funksjon av t . Dette gjør at man må prøve seg frem med tilfeldige verdier av $F(t)$ og løse ligningen i henhold til t . Resultater av t i området $t < t_p$ eller $t > t_w$ gir ugyldige resultater. Den tilhørende infiltrasjonsraten kan dermed finnes ved bruk av ligning (7.4) og dybden på den våte fronten kan finnes ved:

$$z_f'(t) = \frac{F(t)}{(\varphi - \theta_0)} \quad (7.6)$$

Ulike verdier for vanninnholdet, porøsiteten med mer som nevnt i formlene over er funnet ved eksperimentelle forsøk og det er etablert tilgjengelige tabeller for disse verdiene. Eksempler på slike verdier for ulike jordtyper er vist i tabell 3. Direkte bruk av Green Ampt metoden vil være en upraktisk metode ved modellering av hydrologiske prosesser og for å unngå dette problemet utviklet Salvucci og Entekhabi (1994) en tilnærming av Green Ampt metoden som gir $F(t)$ og $f(t)$ som eksplisitte funksjoner av t gitt ved (Salvucci & Entekhabi, 1994):

$$f(t) = K_h^* \cdot \left[0.707 \cdot \left(\frac{t_e + T^*}{t_e} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.667 - 0.236 \cdot \left(\frac{t_e}{t_e + T^*} \right)^{\frac{1}{2}} - 0.138 \cdot \left(\frac{t_e}{t_e + T^*} \right) \right] \quad (7.8)$$

Der t_e er den «effektive tiden» gitt ved:

$$t_e = t - t_p + t_c \quad (7.9)$$

Tiden ved gropmagasinerings, t_p er gitt ved:

$$t_p = \frac{K_h^* \cdot |\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)}{w \cdot (w - K_h^*)} \quad (7.10)$$

Den «komprimerte tiden» t_c er gitt ved:

$$t_c = \frac{F_p}{K_h^*} - \left[\frac{|\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)}{K_h^*} \right] \cdot \ln \left[1 + \frac{F_p}{|\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)} \right] \quad (7.11)$$

Der F_p er mengden vann infiltrert før gropmagasinerings oppstår gitt ved:

$$F_p = w \cdot t_p \quad (7.12)$$

Og T^* er en «karakteristisk tid» som avhenger av jordtypen og vanninnholdet, og er gitt ved:

$$T^* = \frac{|\psi_f| \cdot (\varphi - \theta_0)}{K_h^*} \quad (7.13)$$

Den kumulative infiltreringen er dermed gitt ved:

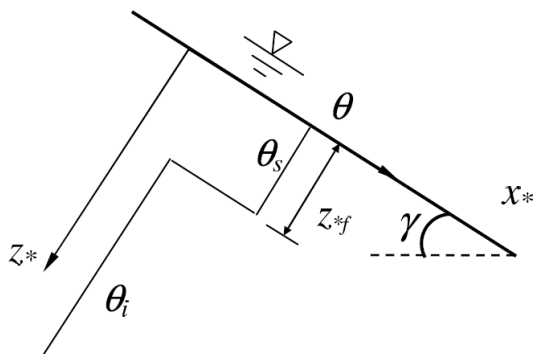
$$F(t) = K_h^* \cdot \left\{ 0.529 \cdot t_e + 0.471 \cdot (T^* \cdot t_e + t_e^2)^{\frac{1}{2}} + 0.138 \cdot T^* \cdot [\ln(t_e + T^*) - \ln(T^*)] + 0.471 \cdot T^* \cdot \left\{ \ln \left[t_e + \frac{T^*}{2} + (T^* \cdot t_e + t_e^2)^{\frac{1}{2}} \right] - \ln \left(\frac{T^*}{2} \right) \right\} \right\} \quad (7.14)$$

Etter som Green Ampt metoden kun tar for seg vertikal infiltrasjon på en horisontal flate uten helning i et homogent medium, vil det føre til usikkerheter ved bruk på grønne tak da grønne tak ofte har en sammensetning av inhomogene jordtyper og andre materialer med helt andre egenskaper. Ekstensive grønne tak er også ofte anlagt på tak med helninger. En metode som tar for seg bruken av Green Ampt metoden på overflater med helning er utviklet av Chen og Young(2006). Dette er en modifisert versjon av Green Ampt metoden og har gitt gode resultater i flere forsøk. Metoden og formelen er gitt ved (Li & Michael, 2006):

$$i = i_c = K_e \cdot \frac{z_f^* \cdot \cos(\gamma) + s_f + H}{z_f^*} \quad (7.15)$$

Der i er den kumulative infiltreringen(mm) ved gropmagasinerings, K_e er den effektive mettede hydrauliske konduktiviteten til mediet(mm/min), Z_f^* er dybden på vannfronten(mm) normalt på overflaten, S_f er den effektive spenningen på den våte fronten(mm), H er

gropmagasineringsdybden på overflaten(mm) og γ er helningen på terrenget(radianer). Dette prinsippet er vist i figur 9.



Figur 9: Modifisert utgave av Green Ampt modellen (Li & Michael, 2006)

Denne modifiserte metoden viste at de teoretiske og numeriske resultatene gav en økt infiltreringsrate med økende helning på terrenget for lavintensiv nedbør da muligheten for gropmagasinerings ble redusert, men avrenningen økte ved en økende helning. Metoden er best egnet for homogene jordsubstrater.

6.9 Snø og snøsmelting

Snø er et porøst materiale som består av is, vann og luft, der mengden luft i snøen angir det tilgjengelige porevolumet i snømengden. Snø endrer egenskaper med temperaturen.

Temperaturer under smeltepunktet vil gi snø med et porevolum fylt med både luft og vanndamp. Ved økte temperaturer vil porevolumet fylles opp med vann og tettheten til snøen endrer seg. Volumet til snø består av det samlede volumet av is, vann og luft. Porøsiteten til snø er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\Phi = \frac{V_a + V_w}{V_s} \cdot 100 \% \quad (8.1)$$

Der Φ er porøsiteten til snøen (%), V_a er volumet bestående av luft(m^3), V_w er volumet bestående av vann(m^3) og V_s er totalvolumet til snøen (m^3). Følgelig kan vanninnholdet i snøen beregnes ved (Dingman, 2008):

$$\alpha = \frac{V_w}{V_s} \cdot 100 \% \quad (8.2)$$

Der α er forholdet mellom vannvolumet og det totale volumet til snøen (%).

Tettheten til snø er gitt ved (Dingman, 2008):

$$\rho_s = \frac{M_i + M_w}{V_s} \quad (8.3)$$

Der ρ_s er tettheten til snøen (kg/m^3), M_i er massen til mengden is i snømengden (kg), M_w er massen til vannmengden (kg) og V_s er totalvolumet til snømengden (m^3). Tettheten til is og vann ved slike beregninger er henholdsvis 917 kg/m^3 og 1000 kg/m^3 . En økt tetthet vil øke egenvekten til snøen og snøen vil bestå av en større vannmengde tilgjengelig til snøsmelting. All snø kan regnes om til vannekvivalenter, noe som er av betydning for overvannshåndtering da dette er den mengden vann som vil renne av når snøen smelter. Dette skjer når temperaturene øker slik at snøen går over til vann. Vannekvivalent fra snø betegnes som den dybden vann man får fra snøsmeltingen (Dingman, 2008):

$$h_m = \frac{V_m}{A} \quad (8.4)$$

Der h_m er den smeltede vanddybden (m), V_m er volumet av smeltet vann (m^3) og A er overflateområdet til snømengden (m^2).

Ligning (8.4) kan omskrives til:

$$h_m = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot h_s \quad (8.5)$$

Der ρ_s er tettheten til snøen (kg/m^3), ρ_w er tettheten til vannet (kg/m^3) og h_s er høyden på den aktuelle snømengde (m). Ved å måle snødybden ute i feltet, veie et prøvestykke av snø med et kjent volum slik at tettheten til snøen beregnes og ved å bruke den kjente tettheten for vann, kan man automatisk beregne ut hvor mye vann som er i snøen ved total smelting.

Smelteperioden av snø starter når netto energi inn er positivt over et gitt tidsrom. Perioden kan deles inn i tre faser: varmefasen der den gjennomsnittlige temperaturen i snøen øker helt til snøen når en isotermisk temperatur på 0°C , modningsfasen der en energitilførsel fører til smelting av snøen men det smeltede vannet er midlertidig bundet i snøen, og avrenningsfasen der en ytterligere tilførsel av energi øker avrenningen av smeltevannet. I flere situasjoner kan snøen smelte før modningsfasen da snøen kan være i kontakt med andre flater med høyere temperaturer (Dingman, 2008).

Netto energi inn til snømengden er sammensatt av følgende prosesser:

- kortbølget stråling fra sola
- langbølget stråling fra jordoverflaten
- varmeveksling med omgivelsene
- latent varmeveksling gjennom faseoverganger
- varmetilførsel av regn
- varmeveksling med grunnen

Varmetilførsel fra regn er den mest interessante prosessen i dette tilfellet da det i denne oppgaven er gjort analyseringer av hendelser der det foregår både nedbør og snøsmelting fra forskningsanlegget. Når regn faller på et snødekke og kommer i kontakt med snøen vil det foregå en varmeveksling. Når regnet har en høyere temperatur enn snøen, vil regnet blir avkjølt av snøen og snøen varmes opp av regnet. Varmen fra regnet som bidrar til snøsmelting er gitt ved (Dingman, 2008):

$$R = \rho_w \cdot c_w \cdot r \cdot (T_r - T_m) \quad (8.6)$$

Der R er varmetilførselen fra regnet(MJ/m² pr. min.), ρ_w er tettheten til vann, c_w er varmekapasiteten til vann(4.19×10^3 MJ/kg K), r er nedbørintensiteten(mm/min), T_r er temperaturen til regnet(^oC) og T_m er temperaturen til snøen = temperaturen ved frysepunktet(0 ^oC).

Når nedbør faller på snø med temperatur under frysepunktet, vil regnet først avkjøles til frysepunktet, gi fra seg varme og til slutt fryse så lenge snøen har lav nok temperatur til å ikke bli påvirket av regnet. I dette tilfellet gis det ikke en ekstra avrenning.

7 Grønne tak på Risvollan

Risvollan er en bydel i Trondheim og ligger omtrent 5 km sør for Trondheim sentrum (Store Norske Leksikon, 2013). Trondheim by har et mildt og fuktig klima, et temperert klima, men nær polarklimasonen. Dette medfører til et ustabil klima der vinteren er preget av mye nedbør i form av snø, men oftere preget av sludd og regn. Middelttemperaturen for januar er $-3,1^{\circ}\text{C}$ og for juli $14,7^{\circ}\text{C}$. Det er kystklimaet som dominerer da Trondheim er omkranset av fjell, men forholdsvis åpent mot havet (Bratberg, 2008).

Våren 2014 ble det bygd et grønt tak på en MC-bod ved Risvollan borettslag i Trondheim. Taket er et forsknings- og demonstrasjonsanlegg som skal øke kunnskapen om hvordan grønne tak trives og fungerer i denne byen. Anlegget er etablert i samarbeid med leverandører av grønne tak, Risvollan borettslag, NVE, Trondheim kommune, NTNU og Fremtidens byer. Taket består av fire ulike typer ekstensive grønne tak som var helt nye ved levering. Figur 10 viser det grønne taket på Risvollan inndelt i fire ulike ekstensive grønne takruter med bokstavene A, B, C og D fra venstre mot høyre.



Figur 10: Forsknings- og demonstrasjonsanlegget på Risvollan

Takrutene er adskilt fra hverandre med en 5 cm høy og 2,5 cm tykk vegg med et flatt beslag på toppen. Langs taklengden er det montert en takrenne inndelt og avpasset til hver takrute for videreføring av det avrente overvannet. Det avrente overvannet renner så gjennom nedløpsrør som føres til et oppsamlingskar. I dette karet er det montert trykksensorer og pumper for måling av vannstand og utpumping av vann. Dette gjør at man kan analysere hver enkel takrute for seg selv.

Takrennen langs takets lengde har en bredde på ca. 13 cm. Langs sidene på taket er det en 8,5 cm bred beslagsplate med en 2,3 cm høy kant for hindring av sprut av nedbørvann opp i takrutene. I toppen og i bunn av taket er det lagt ut dreneringsstein langs taket med dimensjonene 8/16 og 16/28 i en bredde på ca. 50 cm for vindsikring av takmattene. Dette kan ses på figur 11.



Figur 11: Dreneringsstein for vindsikring av takmattene

Selve taket har en helning på 8 %, noe som tilsvarer en vinkel på ca. $4,45^{\circ}$. Dette gjør at det effektive arealet for hver takrute er på ca. 15,135 m² inkludert takrennen. Himmelfretningen for taket er rettet mot øst og beliggenhet er fri for tilstøtende konstruksjoner og trær som kan påvirke vind, skyggeområder med mer. En kontrollmåling av takrutenes dimensjoner ble utført den 25.03.2015 og dimensjonene til de forskjellige takrutene er som vist i figur 12. To utførte målinger av lengden på taket er på henholdsvis 746,9 cm og 748,2 cm.

199,0 cm	200,5 cm	200,4 cm	199,0 cm
746,9 cm			748,2 cm
A	B	C	D
199,5 cm	200,1 cm	200,3 cm	200,0 cm

Figur 12: Takrutenes dimensjoner

7.1 Takrutene ved forsøksanlegget

7.1.1 Takrute A

Takrute A er Veg Tech sin løsning og denne består av to lag: en filtduk med tykkelsen 10 mm og en prefabrikkert sedummatte med tørketålige sedum- og mosearter som gir en byggehøyde på 30 mm inkludert mineraljorden. Filtduken har en vannlagringskapasitet på ca. 8 l/m² og med en drenerende og fuktbevarende funksjon. Densiteten til filtduken er 1280 g/m² og ved full metning veier taket 50 kg/m³ (Veg Tech, 2013). Figur 13 viser oppbygningen av takrute A. Sedummatten består av følgende arter:

- Sedum acre - Gul fetknopp
- Sedum album - Vit fetknopp
- Sedum album - Vit fetknopp "Lime"
- Sedum album - Vit fetknopp "murale"
- Sedum album - Vit fetknopp "coral carpet"
- Sedum kamtschaticum – Kamtjatkafetblad
- Sedum floriferum – Smaragdfetblad
- Sedum pulchellum – Skuggfetknopp
- Sedum sexangulare - Kantig fetknopp
- Sedum hybridum - Sibiriskt fetblad



Figur 13: Oppbygning av takrute A

Grunnet mangel på 2 m² av Veg Tech matten ved levering, er dette området erstattet med en rest fra Bergknapp. Dette gjør at denne takruten har en blanding av to forskjellige matter. Bergknapp matten er ca. 3 cm tykk og består av en fiberduk med mineraljord over. Bergknapp matten benyttes i lag med en miks av andre sukkulenter som vokser på tørre steder med lite krav til jordsmonnet (Bergknapp, 2014).

7.1.2 Takrute B

Takrute B er Sempergreen sin løsning med mineralull som erstatning for jordsubstratlaget. Mineralullen har en tykkelse på 5 cm, en egenvekt på ca. 4 kg/m² i tørr tilstand og ved full metning veier mineralullen ca. ca. 34 kg/m². Vannlagringskapasiteten for mineralullen er på ca. 30 l/m². Over dette laget ligger en kokosmatte bestående av noe substrat og vegetasjon med en total tykkelse på ca. 2-4 cm. Denne matten har en egenvekt på ca. 10 kg/m² i tørr tilstand og veier ca. 15 kg/m² ved full metning. Figur 14 viser oppbygningen av takrute B med

mineralull og kokosmatte. Kokosmatten består av en blanding av 4-8 ulike sedumarter av de listede artene nedenfor:

- Sedum album "Coral Carpet"
- Sedum album "Murale"
- Sedum lydium
- Sedum acre
- Sedum sexangulare
- Sedum hispanicum minus
- Sedum floriferum
- Sedum kamschaticum
- Sedum reflexum



Figur 14: Oppbygning av takrute B

7.1.3 Takrute C

Takruten 3 er Zinco sin løsning og denne består av en sedummatte øverst og med et vekstsubstrat med tykkelsen 5-6 cm under. I figur 15 er det vist oppbygningen til takrute C. Vekstsubstratet består av gjenbrukte nedknuste teglsteinsmaterialer tilpasset plantens behov med tanke på luftutveksling og vannlagringsevne (ZinCo, 2010). Under vekstsubstratet er det et 20 mm tykt dreneringselement med en tynn filtduk i bunnen. Taket bygger ca. 9 cm totalt og har en egenvekt på 60 kg/m^2 i tørr tilstand og en vekt på ca. 90 kg/m^2 ved full vannmetning (ZinCo, 2010).



Figur 15: Oppbygning av takrute C

7.1.4 Takrute D

Takrute D er et sedumtak fra Sempergreen med et dreneringselement fra Oldroyd i bunn. Øverst er det en kokosmatte med 4-8 ulike sedumplanter som for takrute B, men med et 5-6 cm vekstsubstrat under. Vekstsubstratet består av lava, pimpstein og kompost med kornstørrelser fra 0-12 mm. Substratets porevolum kan lagre opp til 350 liter pr. m^3 . Dreneringselementet i bunn er av typen Oldroyd Xv Green med en tykkelse på 20 mm, dreneringshull på 8 mm og med en vannlagringskapasitet på 4 liter pr. m^2 . Mellom

dreneringselementet og substratet er det innlagt en filtduk for atskilling av materialene. Figur 16 viser oppbygningen av takrute D. Følgende sedumarter kan finnes i denne takruten:

- Sedum album "Coral Carpet"
- Sedum album "Murale"
- Sedum lydium
- Sedum acre
- Sedum sexangulare
- Sedum hispanicum minus
- Sedum floriferum
- Sedum kamschaticum
- Sedumreflexum



Figur 16: Oppbygning av takrute D

7.2 Måleutstyret ved forsøksanlegget

På forsøksanlegget registreres det data daglig fra ulike måleapparater og i oppstarten av masteroppgaven ble det satt av ukentlig oppsyn av dette utstyret slik at det sikres gode data. På forsøksanlegget er det utført målinger av følgende parametere:

- Nedbør
- Vannstandene i oppsamlingskarene
- Jordfuktighet og jordtemperatur
- Lufttemperatur
- Relativ luftfuktighet

Nedbørmåleren på det grønne taket er en vippenedbørmåler, en korttidsmåler av typen Lambrecht med en målenøyaktighet på 0,1 mm pr. tipp. Måleren er oppvarmet slik at man unngår ising og oppstuvning av snø. Registrering av målingsdataene er gjort med intervaller på 1 minutt (Lambrecht, 2014). Nedbørmåleren på taket er som vist på figur 17. Vippenedbørmålere samler opp nedbør over korte tidsperioder i et balansert reservoar bestående av to små kammer. Nedbøren inntreffer det første kammeret og når dette kammeret fylles opp til en gitt vekt, vil dette



Figur 17: Bilde av nedbør-, temperatur- og relativ luftfuktighetsmålere

kammeret tippe over. Kammeret tømmes og det andre kammeret samler opp nedbørsvann. Dermed oppstår det vippinger av karene og antall vippinger er dermed relatert til nedbørintensiteten (Butler & Davies, 2011). Diameteråpningen for oppsamling av nedbør bør ikke være på mindre enn 30mm, målere med plasseringer slik at de er utsatt for vindforstyrrelser og uten beskyttelse mot vind skal helst korrigeres for dette og man skal ha visse avstander fra andre gjenstander som trær og bygninger (Dingman, 2008). På det grønne taket på Risvollan er vippedebørsmåleren plassert helt åpent og i høyden slik at man unngår effekten fra tilstøtende trær eller bygninger, men den er ikke skjermet mot vind.

Nedbørmålere bør kontrolleres med gitte tidsrom mot gjentetting av jordrester eller andre materialer. Målinger av lufttemperatur og relativ luftfuktighet er lite påvirket av feil og disse har levert gode resultater gjennom hele målingsperioden. Målingene fra disse apparatene er levert av NVE og måleapparatene er vist i figur 17. Alle disse målingene registreres med intervaller på 15 minutter og oppdateres i dataloggeren som er plassert inne i MC-boden.

Prosjekttaket er som nevnt tidligere oppdelt i fire takruter der hver takrute har en tilkobling til et eget oppsamlingskar for oppsamling av det avrente vannet fra taket. Dimensjonene til de forskjellige oppsamlingskarene er vist i tabell 4 og målingene ble utført 28. januar 2015 under et driftsbesøk. De målte grunnarealet for oppsamlingskarene er brukt videre i dataanalyseringsarbeidet som presenteres senere i kapittel 9.

Tabell 4: Dimensjonene til oppsamlingskarene

Oppsamlingskar	Grunnareal
A	0,1628 m ²
B	0,1599 m ²
C	0,1584 m ²
D	0,1588 m ²

I oppsamlingskarene er det en trykksensor for måling av vannstandsendringer i karene og det er montert inn pumper for automatisk tømning. Pumpene starter når vannstanden når en høyde på ca. 53 cm og avslutter ved en høyde på ca. 15 cm. Trykksensorene bør kontrolleres jevnlig mot gjentettinger slik at man unngår feilmålinger. Under optimal drift er det i de ulike oppsamlingskarene gjennomført en rekke tester av målenøyaktigheten til trykksensorene ved manuell tilførsel av vann i oppsamlingskarene. Med dette fant man ut at trykksensorene overestimerer vannstandsverdiene noe i forhold til de manuelle målingene. Resultatene av

dette er vist i tabell 5. Hyppigheten av registreringer av vannstandene i oppsamlingskarene er avhengig av avrenningsintensiteten fra takrutene og oppdateringen kan variere fra 1 minutt til 1 time mellom hver registrering.

Tabell 5: Dataloggerens overestimering av vannstandene i karene

Oppsamlingskar	Gjennomsnittlig prosent overestimering
A	5,31 %
B	6,51 %
C	3,97 %
D	8,76 %

En annen test som gikk ut på å kontrollere målenøyaktigheten til trykksensorene uten noen endring av vannstanden i oppsamlingskarene er nevnt senere i kapittel 7.1.1.

Jordtemperatur og jordfuktighetsmålingene er utført ved at hver takrute har to målere og disse er plassert i hver ende av takruten, stukket 45 grader inn under substratlaget. Jordtemperatur og jordfuktighet måles i en og samme måler. Jordfuktighetsmålerne måler fuktigheten i jorda og dette gir en indikasjon på i hvilken grad jorden er mettet med vann. Jordtemperaturene måles i grader Celsius. Målingene registreres med intervaller på 15 minutter. Det bør også utføres jevnlig oppsyn av disse målerne da det har blitt observert at en av målerne i takrute D var dratt ut av posisjon i en kort periode. Måleapparatene er plassert tilnærmet likt for alle takrutene der den nederste måleren og den øverste måleren er plassert henholdsvis ca. 95 cm og 240 cm fra takrennen og oppover. Målerne er også plassert midt i takruten i breddelengde. Måler nr. 1 er plassert nederst på taket og denne registreres som oftest de største jordfuktighetsverdiene. I hele oppgaveperioden er det registrert jordfuktighetsverdier fra et minimum på 0,97 til et maksimum på 20,1 og det er antatt at jordsubstratet oppnådde full metning ved dette punktet. Disse verdiene er konvertert til prosentverdier og en verdi på ca. 4,8 % anses som visnepunktet, den laveste verdien substratet kan ha før plantene tørker ut.

8 Behandling av data

En del av denne oppgaven består av å bearbeide og analysere data fra forsøksanlegget på Risvollan. Dataserier hentes ut og arbeides med i verktøyet Microsoft Excel. Man kan hente ut korte eller lange dataserier, dataene kan være i ulike formater som må behandles og støy i dataseriene må fjernes. Med støy i dataserien menes det unødvendige, feilaktige og misvisende verdier som er av liten eller ingen betydning i dataserien og som ikke kan anses å være normale ut fra forventningene. Det kan være feilmålinger, manglende verdier, unormalt lave eller høye verdier som kan være forårsaket av svikt i selve apparatet, menneskelige feil som uheldig plassering og behandling av apparatet samt ytre påvirkninger fra miljøet. Støy i dataserien kan også være korrekte verdier, men verdier som registreres med en så høy frekvens og med store tilfeldige variasjoner slik at verdiene i sin helhet gir unødvendig og mangelfull informasjon. Dette gjør at måleinstrumenter og dataserier bør kontrolleres jevnlig for sikring av feilfri data til videre bruk. Etter at dataseriene er formatert til riktig format og forstyrrelser er skilt ut, kan analyseringsarbeidet starte. I dette prosjektet har behandlingen og korrigeringen av avrenningsdata fra takrutene vært av en større utfordring enn det som var tenkt. Som nevnt tidligere renner overvannet av fra takrutene og samles opp i et oppsamlingskar. Når en nedbørhendelse inntreffer, foregår det en endring av vannstanden i oppsamlingskaret og dette registreres med en frekvens avhengig av nedbøren og avrenningens intensitet. En enkel nedbørhendelse vil gi avrenningsdata av en størrelsesorden der det kreves metoder for fjerning av støy i dataserien.

Ulike prosesser og hendelser kan påvirke vannstanden i oppsamlingskarene. Dette kan være frysning av det oppsamlede vannet, gjentettinger i trykksensorene, avviksmålinger og fordampning fra karet. På forsøksanlegget på Risvollan er oppsamlingskaret vanntett, trykksensorene er kontrollert mot gjentettinger og det er lagt oppvarmingsrør i karet for å unngå frysning av vannet på vinteren. I oppsamlingskaret foregår det en utpumping av vannet når vannstanden når en gitt høyde. I det tidsrommet der vann pumpes ut av karet vil vannstanden minke. Vannstanden i oppsamlingskarene er gitt i meter og tidspunktet mellom hver oppdatering registreres. Med et konstant grunnareal, kan volumet og følgelig avrenningen til karene beregnes i liter/sekund. Dette vil være den gjennomsnittlige avrenningen i det enkelte tidsrommet mellom to vannstandsmålinger. Dermed vil det oppstå negative avrenningsverdier under en pumpehendelse som må korrigeres for. En utfordring med dette er at ved utpumping av vann fra oppsamlingskaret under en nedbørhendelse, vil det også være en tilførsel av vann fra taket i det tidsrommet pumpen pumper ut vann fra karet.

Denne tilførselens intensitet og mengde er ukjent og en metode for å erstatte avrenningen i dette tidsrommet må utformes. Intensiteten og avrenningsmengden i dette tidsrommet kan beregnes hvis man vet pumpens kapasitet og antar at denne alltid pumper med en konstant hastighet fra start til slutt. Dette er ikke tilfellet i virkeligheten da det tar en viss tid før pumpen oppnår sin konstante hastighet og en viss tid før at hastigheten avtar nok til at den har nådd en fullstendig stopp. Dette tilsier at det vil alltid være noen usikkerheter ved korrigeringer av vanntilførselen til karet i dette tidsrommet, men betydningen av denne usikkerheten kan diskuteres. I denne oppgaven er det antatt at usikkerhetene ved denne hendelsen er av en mindre betydning når man ser på helheten av systemet. I denne oppgaven er det utformet en algoritme som tar for seg erstatning av ukjente verdier og en reduisering av støy i dataserien. Algoritmen er utformet ved bruk av programmet Visual Basic i Microsoft Excel.

Det er nødvendig å redusere støy i dataserien for å få nøyaktige verdier og for å kunne utføre beregninger av for eksempel den avrente vannmengden fra takrutene, når avrenningen fra takrutene inntreffer, når avrenningen avslutter, når avrenningstopper inntreffer med mer. Ukjente verdier og støy må også korrigeres for å kunne gi gode visuelle fremstillinger av avrenningsgrafer.

8.1 Automatiske funksjoner og fremgangsmåter

For å analysere nyttiligheten ved bruk av grønne tak er det viktig å bruke så korrekte data som mulig. Til beregninger er det aktuelt å se på både nedbørsdata og avrenningsdata fra det grønne taket. Til dette formålet ønsker man så nøyaktige verdier som mulig og med minst mulige justeringer av de virkelige dataene. Etter at dataseriene er kontrollert for ulike feilmålinger som måtte oppstå, er det tømningshendelsen av karet og andre varierende avviksmålinger samt støy som må bearbeides. Ut fra driftsbesøk og tester på forsøksanlegget er det valgt i denne oppgaven å anta et støyområde som representerer vannstandsendringer i oppsamlingskarene på +/- 3 mm. Det vil si at alle vannstandsendringer i oppsamlingskarene mindre enn + 3 mm og større enn - 3 mm uavhengig av tidsrommet mellom målingene anses som støy. Testingen av dette foregikk ved at man oppdaterte vannstandsmålingene i oppsamlingskaret kontinuerlig 40 ganger med ca. fem sekunders pause mellom hver måling. Testen fant sted 05.03.2015 kl. 09:40 med minimale muligheter for fordampning og ingen nedbør. De registrerte målingene i denne testen for oppsamlingskar A og B er vist i tabell 6 og 7. Oppdateringene av målingene ble gjennomført fra venstre og mot høyre.

Tabell 6: Vannstandsmålinger i oppsamlingskar for takrute A

0.230	0.230	0.230	0.231	0.231	0.231	0.230	0.231	0.230	0.231
0.231	0.230	0.231	0.231	0.231	0.230	0.232	0.231	0.231	0.231
0.231	0.230	0.231	0.230	0.231	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230
0.231	0.231	0.231	0.231	0.230	0.230	0.231	0.231	0.230	0.231

Tabell 7: Vannstandsmålinger i oppsamlingskar for takrute B

0.252	0.253	0.254	0.254	0.254	0.254	0.253	0.254	0.254	0.255
0.254	0.254	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253	0.252	0.253	0.253
0.253	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253	0.254	0.254	0.254
0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.255	0.254	0.254	0.254	0.254

Fra tabell 6 og 7 er det en maksimal forskjell mellom laveste og største verdi på 3 mm. En annen test ble utført med en omrøring i oppsamlingskar A og resultatene fra denne testen er gitt i tabell 8. Omrøringen var av en intensitet som skal forestille bevegelse av vannet forårsaket av avrenning av overvann gjennom takrennen og ned i karet.

Tabell 8: Vannstandsmålinger i oppsamlingskar for takrute A med omrøring

0.233	0.232	0.233	0.233	0.232	0.232	0.232	0.232	0.232	0.232
0.232	0.232	0.233	0.232	0.232	0.233	0.232	0.233	0.233	0.233
0.232	0.233	0.232	0.232	0.232	0.232	0.233	0.232	0.232	0.232
0.231	0.231	0.232	0.232	0.231	0.232	0.232	0.232	0.232	0.233

Fra tabell 8 ser man at denne omrøringen var ubetydelig i forhold til de andre testene fra tabell 6 og 7, og man kan anta at man ikke får avviksmålinger i vannstanden i oppsamlingskaret grunnet avrenning av overvann fra taket. Med dette som grunnlag for hva som anses som støy, vil alle støyverdier i algoritmen bli satt lik 0.

8.1.1 Påvirkning ved bruk av beregningsmetodene

En slik støyreducerende metode vil påvirke beregninger av det totale avrente volumet fra takrutene, tidspunktet for når avrenning fra taket starter, tidspunktet for når avrenningen fra taket avsluttes med mer samt noen enkelte målinger kan bli utelukket. Det beregnede totale avrente volumet fra taket vil reduseres ved et økende kriterium for hva som anses som støy, men avrenningsvolumet vil også kunne bli overestimert uten bruk av en metode for fjerning av støy. Dermed vil korrekte beregninger være avhengig av gode metoder for fjerning av støy, men det vil alltid være noen usikkerheter.

Tidspunktet for når avrenning fra taket inntreffer er påvirket av den valgte metoden i den grad at det ikke registreres avrenning før vannstandsendingene overstiger det valgte støynivået. Dette gjør at det beregnede tidspunktet vil være noe forskjøvet i forhold til virkelige observasjoner ute i feltet avhengig av nedbørens intensitet og mengde. Tidspunktet for når avrenningen fra taket avslutter er i samme grad påvirket av den valgte støy metoden. I dette tilfellet vil den beregnede avrenningen avslutte noe tidligere enn virkelige observasjoner ute i feltet avhengig av nedbørens intensitet og mengde. Men ut fra det valgte støykriteriet vil den resterende avrenningen som ikke registreres være av en så lav intensitet at det gir en minimal betydning for det helhetlige resultatet. Som nevnt tidligere øker frekvensen på målingene av vannstanden i karene med nedbørintensiteten og noen hurtige vannstandsendinger midt i en nedbørhendelse kan bli utelukket hvis oppdateringsfrekvensen av vannstanden i karene er meget hurtig og vannstandsendingen er minimal. Men dette er av en meget liten betydning.

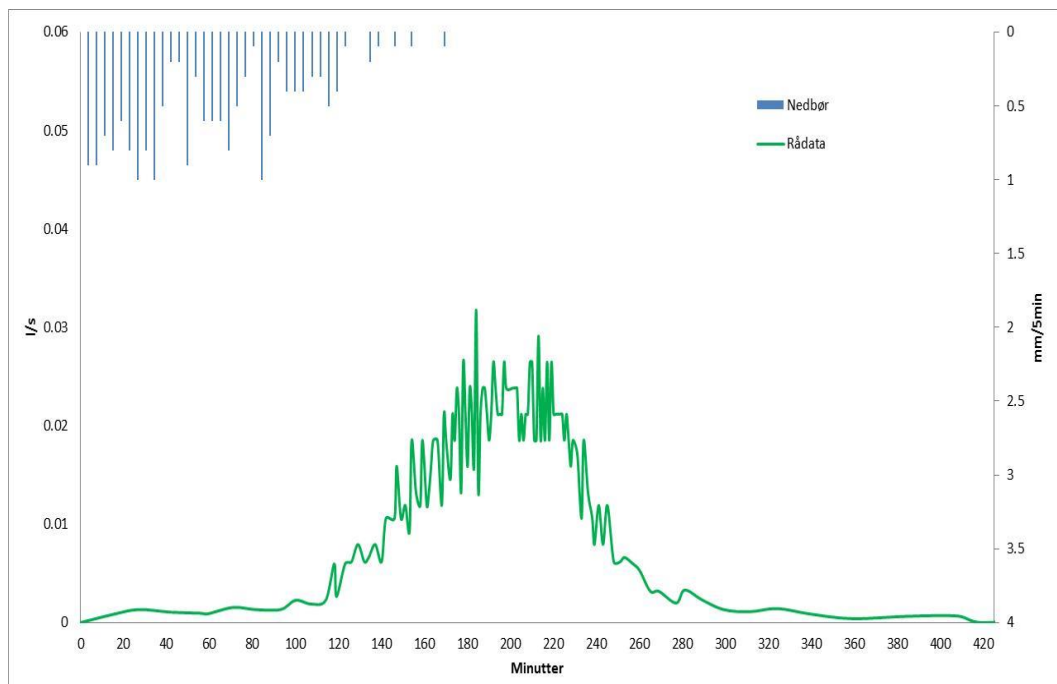
Som nevnt tidligere pumpes vannet i karene ut etter hvert som vannstanden øker og i dette tidsrommet kan det fremdeles foregå avrenning fra taket. Avrenningen i dette tidsrommet må tas med i betraktning og dette kan gjøres på forskjellige måter. I denne oppgaven er det valgt en grense og en konstant verdi som tilsier at det foregår en tømningshendelse i oppsamlingskaret. Alle registrerte verdier med en intensitet mindre enn $-0,01$ l/s anses som en tømningshendelse og erstattes av andre verdier. Denne grensen er valgt ut fra observasjoner av dataserien og den brukte algoritmen erstatter disse verdiene med den nærmeste forrige positive avrenningsintensiteten som foregikk rett før tømningshendelsen inntraff. Det oppstår dermed en usikkerhet i dette tidsrommet men graden av betydningen kan diskuteres da tidsrommet er kun på ca. 2-3 minutter. En annen mulig metode vil være å erstatte avrenningsintensiteten i dette tidsrommet med gjennomsnittet av de to nærmeste positive avrenningsverdiene, men grunnet utfordringer med å få til dette i Visual Basic er dette utelukket og den nevnte forenklete metoden er i stedet brukt. Etter tømningshendelsen

er erstattet av andre avrenningsverdier, vil det totale avrente volumet fra takrutene kunne beregnes. Det totale avrente volumet beregnes ved å multiplisere alle registrerte avrenningsintensiteter med tidsperioden intensiteten gjelder for og deretter summeres alle enkeltvolumene. Nedbørsvolumet beregnes ved å summere antall millimetre og multiplisere dette med det effektive takarealet til hver enkelt takrute. Etter disse beregningene, gjenstår det å lage en grafisk fremstilling av resultatene og dette er nevnt nedenfor under kapittel 8.2.

8.2 Data til grafiske fremstillinger

Et mål er å lage gode grafiske fremstillinger av de dataseriene man jobber med og for å gjøre dette trengs det en egnet metode for å rydde opp i dataserien til grafiske fremstillinger. Dette kapitlet tar for seg redusering av støy i dataserien slik at grafer kan presenteres ryddig og forklarende for leseren.

Fra observasjoner av rådataene fra forsøksanlegget er det store mengder data som inneholder hurtige og mindre informative variasjoner i avrenningsintensiteten fra takrutene, noe som gjør at grafer blir lite tydelige. Dermed må det brukes en metode som gir et bedre visuelt grafisk bilde av prosessen. Dette må være en metode som jevner ut unødvendige variasjoner samt bevarer andre kritiske og viktige verdier. Dette byr på utfordringer og man vil aldri kunne få sammensatte data som gir et eksakt bilde av virkeligheten. I figur 18 er det presentert en graf satt sammen av rådata fra avrenningen fra takrute D på forsøksanlegget 25.juli 2014.



Figur 18: Avrenningskurve av rådata fra takrute D ved en nedbørhendelse 25.juli 2014

Fra figur 18 ser man en trend med en økende intensitet på avrenningen og en avtagende intensitet på avrenningen etter et maksimumspunkt er nådd, men grafen gir et meget upresist bilde av prosessen og det er vanskelig å anslå noe som helst. Ca. 100 minutter ut i hendelsen øker avrenningsintensiteten samt antall dataregistreringer og variasjonene mellom datapunktene. Ved et tidspunkt oppnår avrenningsintensiteten en maksimumsverdi men det er meget uklart om denne verdien er et betydelig maksimumspunkt etter som dette kun er en

enkel registrering. Etter den maksimale avrenningsintensiteten er nådd, avtar avrenningen fra taket og antall dataregistreringer reduseres. I starten og slutten av hendelsen er avrenningsintensiteten mindre, det registreres færre data og grafen er jevnere. Til utvalg av data for fremstilling av avrenningskurver er det satt et kriterium der avrenningsintensitet må være større enn 0,01 l/s for at hendelsen er aktuell å ta med i betraktningene. Dette grunnet avrenningshendelser bestående av en avrenningsdata med avrenningsintensitet under dette nivået er ubetydelig for overvannshåndteringen og vil bestå av meget uklare data med en betydelig andel støy.

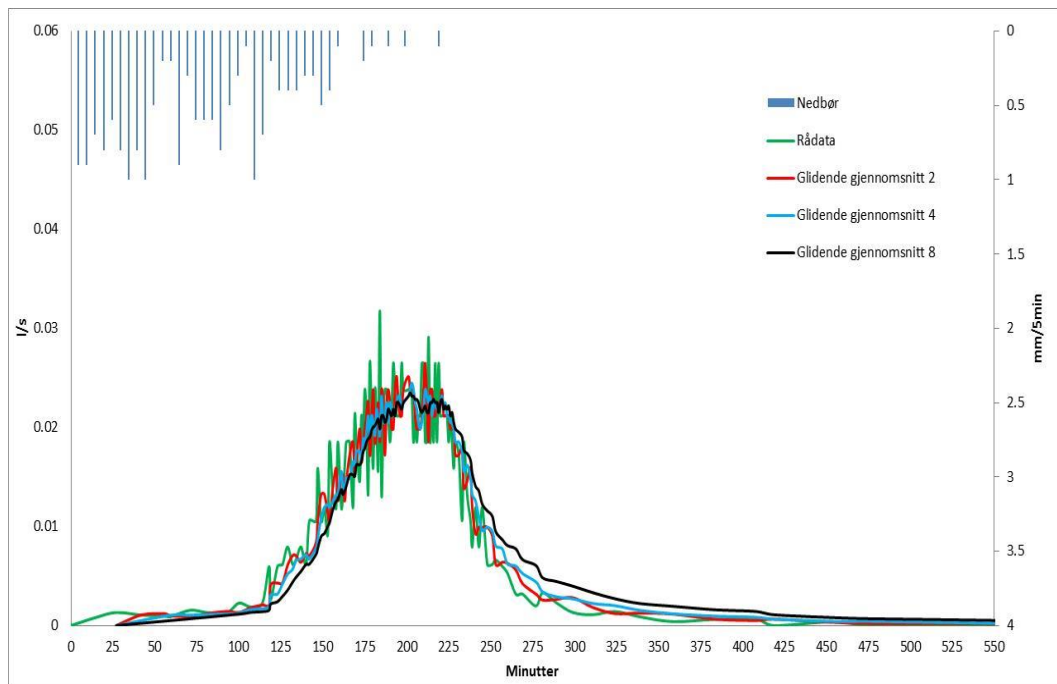
8.2.1 Utfordringer

Det er en rekke utfordringer som oppstår ved å lage en metode som fjerner støy i dataserien slik at grafen visuelt kan lettere forstås samt bevare de viktigste verdiene og kunne gi et så godt bilde av virkeligheten som mulig. Man ønsker tydelige grafiske fremstillinger av tidspunkt der når avrenningen starter, hvor hurtig avrenningen stiger, størrelse og tidspunkt for når den maksimale avrenningstoppen inntreffer og hvordan avrenningen avtar i forhold til nedbøren. En utfordring vil være å ta i bruk en støygrense som fjerner nok støy og unngår de største og hyppige mindre informative variasjonene i dataserien som vist i figur 18. Metoden bør også ta vare på små avrenningsintensiteter slik at begynnelsen og avslutningen på avrenningen blir bevart. Avrenningsgrafer vil være av ulike former avhengig av nedbørintensiteten og man oppnår sjeldent optimale avrenningskurver med en jevn stigning opp til et maksimumspunkt og med en jevn nedgang til avrenningen avsluttes. Generelt ønsker man å bevare alle økende verdier opp til et maksimumspunkt og bevare alle minkende verdier etter maksimumspunktet er nådd. Men en dataserie kan både ha økende og minkende verdier som svinger slik at dataserien inneholder flere avrenningstopper og derfor må det opprettes en algoritme som tar hensyn til dette. For å få nøyaktige resultater kan man gjøre et slikt arbeid manuelt, men ved analysing av lange dataserier vil dette være svært tidkrevende. I denne oppgaven er det en hensikt å se på metoder som kan gjøre dette automatisk.

8.2.2 Glidende gjennomsnitt

Glidende gjennomsnitt er en matematisk funksjon innebygd i Microsoft Excel som beregner gjennomsnittet over et gitt antall data og beveger seg gjennom dataserien. Utjevningen av grafen øker med antallet verdier gjennomsnittet beregnes over som vist i figur 19. En ulempe og en begrensning med denne metoden er at virkelige data fjernes og erstattes av andre verdier og man kan miste informasjon om svingninger i avrenningen. Fordelene er at kurven blir visuelt enklere å se på. En økt utjevning av kurven vil fjerne en større andel av de

virkelige dataene. Figur 19 viser ulike grafer konstruert med denne metoden der gjennomsnittet er beregnet over to, fire og åtte verdier gjennom dataserien.



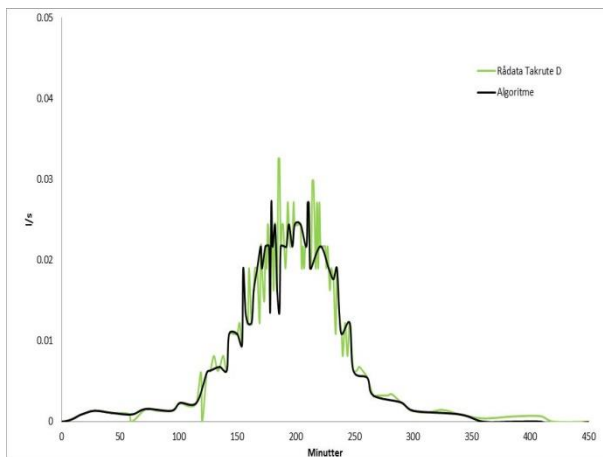
Figur 19: Grafisk støyreduisering med den matematiske funksjonen glidende gjennomsnitt

Fra figur 19 ser man at grafen blir jevnere, avrenningen stiger og avtar mer langsomt ved et økende antall verdier funksjonen beregner gjennomsnittet over. Den maksimale avrenningsintensiteten er også redusert og erstattet av andre verdier. Grafen vil forskyves i henhold til antall verdier funksjonen beregner gjennomsnittet over og man kan miste noe informasjon i starten av hendelsen.

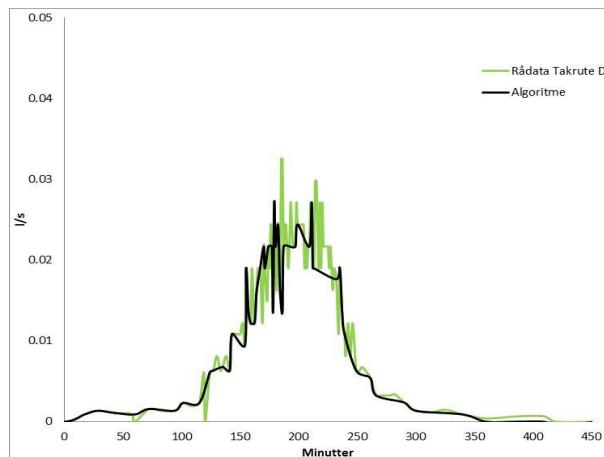
8.2.3 Algoritmen i dette prosjektet

Den konstruerte algoritmen for fremstilling av grafer i dette prosjektet opererer på en annen måte enn den nevnte metoden ovenfor. Algoritmen ser på trenden av dataserien der differansen mellom to punkter må overskride et kriterium for at data skal bevares. Det valgte kriteriet er bestemt ut fra tester av algoritmen og er kun for å gi et bedre visuelt bilde av avrenningshendelsene. Kriteriet er et forholdstall mellom to ulike verdier i dataserien. Algoritmen starter på en nåværende verdi og sjekker differansen mellom nåværende verdi og forrige verdi. Hvis dette kravet oppfylles, undersøker algoritmen om differansen mellom neste verdi og forrige verdi også oppfyller kriteriet. Hvis dette kriteriet oppfylles, blir nåværende verdi plottet inn i en ny dataserie. Hvis kriteriet ikke oppfylles vil funksjonen bevege seg til neste punkt og utføre samme operasjon. Dette gjør at algoritmen undersøker om en trend i

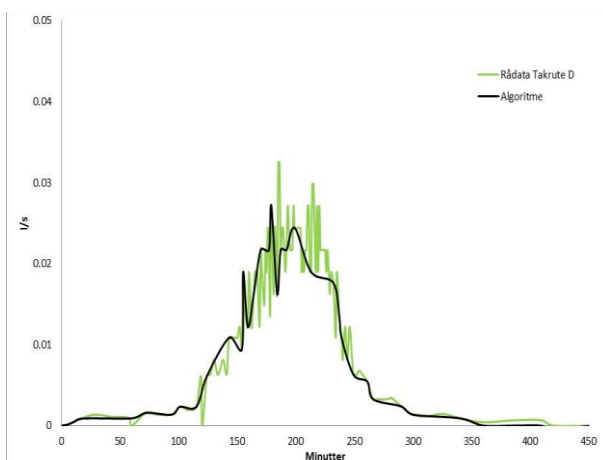
dataserien mellom to punkter etterfølges av samme type trend mellom neste verdi i dataserien. Et eksempel er hvis det er en økende trend i avrenningsintensiteten, vil nåværende verdi bevares og plottes inn i ny dataserie hvis også neste verdi i serien følger den samme økende trenden. Det samme gjelder for en avtagende avrenningsintensitet. Slikt beveger algoritmen seg videre gjennom hele dataserien. I algoritmen er det en forskjell mellom kriteriet for den økende og avtagende avrenningsintensiteten. Kriteriet for bevaring av verdier er noe strengere for de økende avrenningsintensitetene da disse har som regel flere antall høyfrekvente verdier enn antallet av verdier når avrenningen avtar. Et eksempel ved bruken av algoritmen for redusering av støy i avrenningsdata er vist i figur 20, 21, 22, 23, 24 og 25.



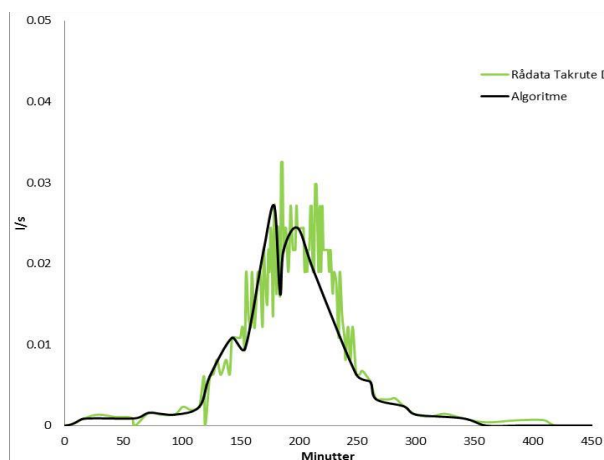
Figur 20: Støykriterienivå 0,20



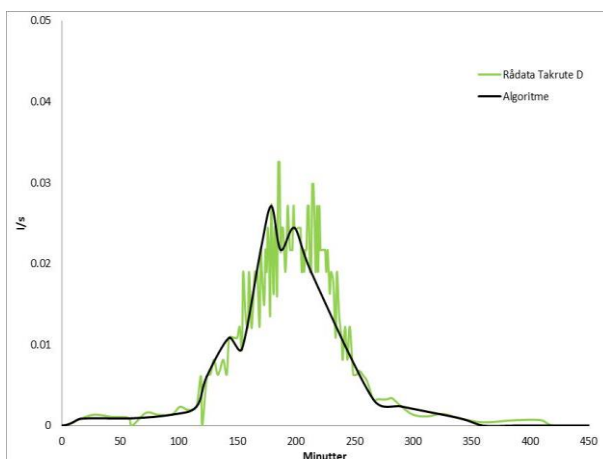
Figur 21: Støykriterienivå 0,25



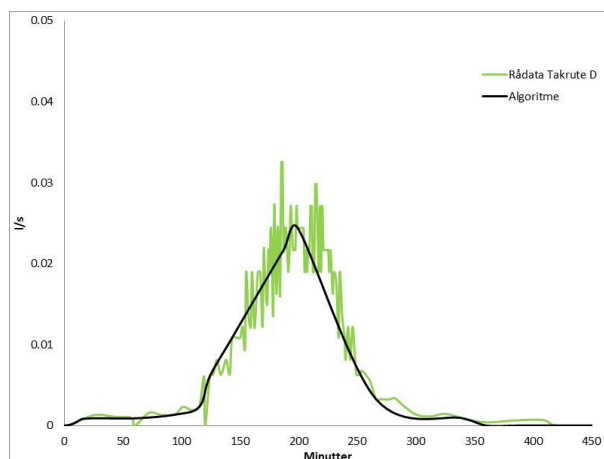
Figur 22: Støykriterienivå 0,40



Figur 23: Støykriterienivå 0,45



Figur 24: Støykriterienivå 0,55



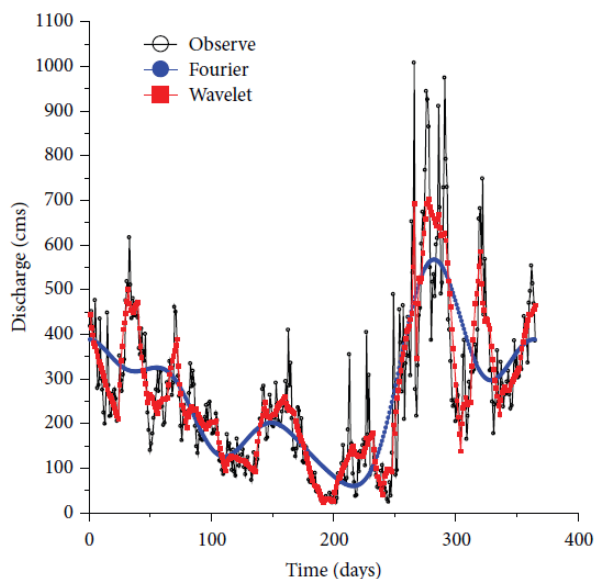
Figur 25: Støykriterienivå 0,60

Fra figurene ovenfor ser man at valget av et støykriterienivå er av stor betydning for fremstilling av avrenningsgrafer. Algoritmen tar vare på alle opprinnelige verdier som oppfyller kriteriet og unngår verdier som anses som støy. Et økende støykriterienivå vil redusere antall data som blir bevart og gi en økende utjevning av kurven, men enkelte

endringer av avrenningsintensiteten som blir sett på som ubetydelige, vil ikke bli bevart. Fra den enkelte avrenningshendelsen og det valgte kriteriet, kan innflytelsen ved at slike verdier ikke blir bevart diskuteres. Sammenhengen mellom verdiene i den nye korrigerte dataserien vil være avhengig av Excels funksjon for dette. Valg av diagramtype er også av betydning, men ut fra observasjoner er det valgt et punktdiagram med utjevnete linjer.

8.2.4 Wavelet transformasjonen

Den diskrete Wavelet transformasjonen er en metode som er vist seg å være svært godt egnet for redusering av støy i lange hydrologiske dataserier. I praksis er hydrologiske hendelser som nedbør og avrenning av ikke-stasjonære tidsserier og ikke-lineære prosesser. Dette gjør at andre type støyfjerningsmetoder som Fourier utjevning, Wiener filter og Kalman filter har et begrenset bruksområde innen hydrologisk modellering (Chou, 2014). Konseptet til Wavelet-metoden er å dele opp hydrologisk data til lavfrekvente og høyfrekvente signaler. De viktige og brukbare signalene opptrer som lavfrekvente signaler og støy opptrer som høyfrekvente signaler. De lavfrekvente og høyfrekvente signalene splittes og de høyfrekvente signalene dekomponeres ved bruk av Wavelet transformasjonen. Deretter settes det grenseverdier for



Figur 26_ Wavelet- og Fourier metoden for støyreduering (Chou, 2014)

hva som skal bevares av de høyfrekvente signalene og til slutt oppnås et støyreduert datasett ved å rekonstruere de dekomponerte dataene. Transformasjonen kan utføres flere ganger på samme datasett og et økt antall gjennomganger av transformasjonen vil øke utjevningen av dataserien. Bruk av Wavelet-metoden med tre transformasjoner kontra Fourier-metoden for redusering av støy i avrenningsdata er vist i figur 26.

Fra figur 26 ser man at ved bruk av Wavelet transformasjonen er kritiske punkter bevart og mindre variasjoner er utelukket. Grunnet kompleksitet er denne metoden utelatt i dette prosjektet.

9 Avrenning fra ekstensive grønne tak på Risvolla

I det følgende vil det bli vist grafiske fremstillinger av ulike nedbørhendelser fra forskningsanlegget på Risvolla ved bruk av en konstruert algoritme for redusering av støy. Støy reduseres med de tidligere nevnte metodene der data med variasjoner på +/- 3 mm er fjernet, tømningshendelser er korrigert for og grafer jevnes ut.

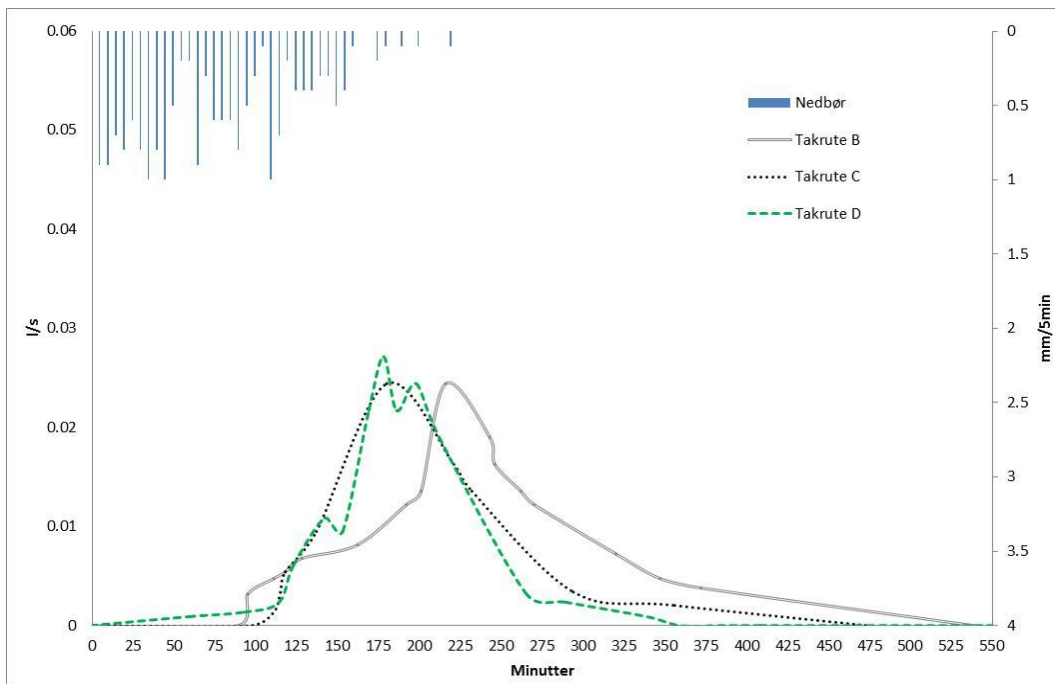
Dataregistreringen fra måleapparatene ved forsøksanlegget startet opp 10.juni 2014, men grunnet vedlikehold, testing, kalibrering og kontrollering i oppstartsfasen, er det kun aktuelt å bruke data fra og med 14.juli 2014 til analyseringsarbeidet. I perioden august til desember 2014 oppstod det konflikter med måleutstyret og mengden data i denne perioden er begrenset.

I det følgende er det kun vist grafiske fremstillinger av de mest interessante nedbørhendelsene som oppstod i tidsperioden fra og med 14.juli 2014 til og med 1.juni 2015. Det vil si nedbørhendelser som er intense nok og med en stor nok nedbørmengde til å gi et merkbart utslag på avrenningen til oppsamlingskarene og som er tydelig avgrenset i tid. Varigheten til hendelsene er bestemt av den tiden det tar før nedbørhendelsen er over og avrenningen til oppsamlingskarene avsluttes ved det gitte støykriteriet. Hvis det inntreffer nedbør før avrenningen stanser opp, blir dette å betrakte som en og samme hendelse med en forlenget varighet. Dette er gjort for å få de mest nøyaktige resultatene da det ellers ville vært meget utfordrende å anslå hvor avrenningen skal avsluttes i en dataserie med en kontinuerlig tilførsel av overvann til oppsamlingskarene. Det vil bli sett på når avrenningen fra takrutene inntreffer i forhold til oppstarten av nedbøren, beregnet total avrent volum samt redusering og fordrøyning av nedbørtopper. Etter som det kan inntreffe flere maksimale nedbørtopper er det i algoritmen kun sett nærmere på den største og første nedbørtoppen som inntreffer.

Det er også blitt sett på RECARGA som et mulig simuleringsprogram for grønne tak og grafiske fremstillinger samt beskrivelse av programmet er beskrevet i kapittel 9.7.

9.1 25.juli 2014

Den første nedbørhendelsen til bruk i analyseringsarbeidet fant sted 25.juli 2014 kl. 13:00. Denne hendelsen er den korteste av de andre hendelsene som er vist grafisk og med den største nedbørintensiteten. I denne hendelsen er det registrert totalt 18,4 mm nedbør i løpet av 3 timer og 35 minutter, forrige nedbørhendelse fant sted 17.juli kl. 17:07 og neste registrerte nedbør fant sted 29.juli kl.. 19:11. Med dette er det anlagt nok tid for at avrenningen fra takene til avsluttes før en ny nedbørhendelse inntreffer. Den gjennomsnittlige lufttemperaturen i dette tidsrommet var på ca. 20 °C. Figur 27 viser en grafisk fremstilling av avrenningen fra de ulike takrutene i henhold til nedbøren. Avrenningen fra takrutene til oppsamlingskarene er gitt i l/s, nedbørmengdene er vist med intensiteten mm/5min og tidsserien er vist i minutter.



Figur 27: Avrenningskurver for takrute B, C og D den 25.juli 2014

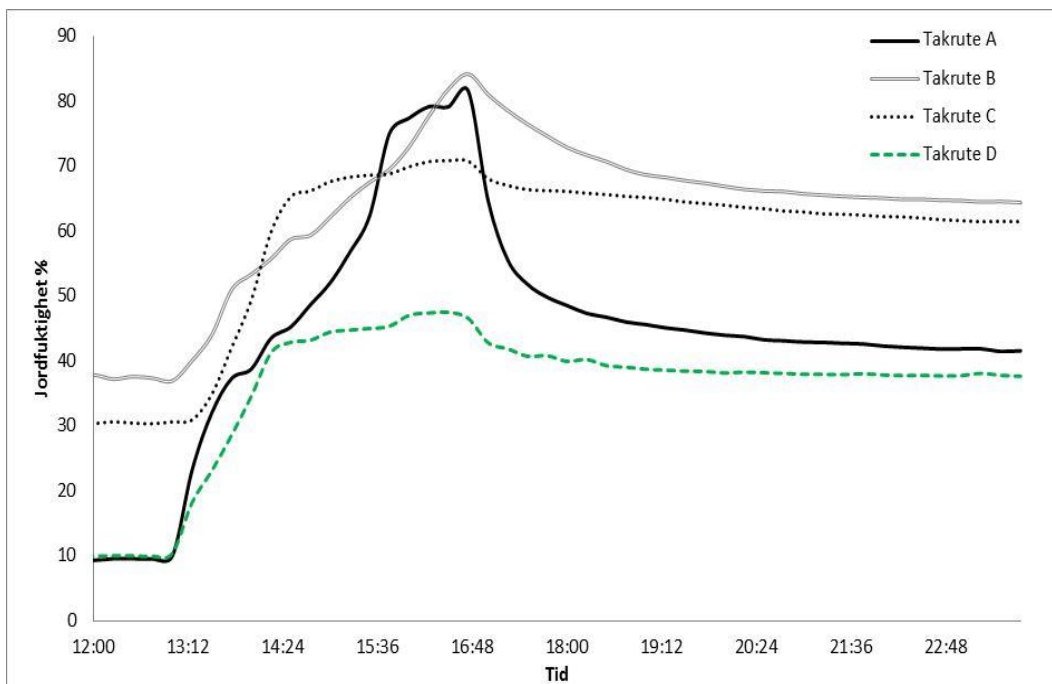
Av ukjente årsaker har det oppstått en feil i avrenningsmålingen fra takrute A for denne hendelsen og dermed er ikke avrenningen fra takrute A tatt med i betraktningen. Den registrerte avrenningen med den gitte metoden for redusering av støy, registreres tidligst for takrute D og senest for takrute C. Den maksimale registrerte avrenningen er størst for takrute D og lavest for takrute C i dette tilfellet, men forskjellen er minimal. Nedbørtoppen er redusert med 70,9 %, 71,2 % og 68,5 % for henholdsvis takrute B, C og D. Avrenningen stiger hurtigst og tilnærmet likt for takrute C og D, men avrenningen avtar også hurtigst etter nedbøren er avsluttet. Avrenningen fra takrute B stiger og avtar mer langsomt. Den totale

tilbakeholdte vannmengden fra nedbøren i dette tilfellet er på 27,7 %, 46,6 % og 46,5 % for henholdsvis takrute B, C og D. Tabell 9 viser en oppsummering av resultatene for denne nedbørhendelsen.

Tabell 9: Avrenningsresultater fra nedbørhendelsen 25.juli 2014

Takrute	Start av avrenning	Tilbakeholdt mm før avrenning	Redusering av nedbørtopp	Forskyvning av nedbørtopp	Tilbakeholdt volum
A	-	-	-	-	-
B	24 min	3,9 mm	70,9 %	158 min	27,7 %
C	43 min	7,4 mm	71,2 %	122 min	46,6 %
D	15 min	2,6 mm	68,5 %	120 min	46,5 %

De målte jordfuktighetene for de ulike takrutene er vist i figur 28. Som nevnt tidligere er det plassert to jordfuktighetsmålere på hver takrute men i det følgende er det bare presentert resultater fra jordfuktighetsmåler nr. 1 for hver takrute da denne er plassert nederst på takruten og med de største verdiene. I dette tilfellet er det et opphold på ca. 5 dager siden forrige registrerte nedbør og jordfuktigheten er deretter.



Figur 28: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 25.juli 2014

Fra figur 28 ser man at jordfuktigheten for alle takrutene stiger hurtig fra og med ca. 12 minutter etter nedbøren inntreffer kl. 13:00. Både takrute A og D har den laveste jordfuktigheten på 10 % før nedbørhendelsen inntreffer. Takrute B og C har en noe større jordfuktighet på henholdsvis 37 % og 31 % før nedbøren inntreffer. Kl. 16:45 oppnår både takrute A og B de største jordfuktighetsmålingene for denne hendelsen på henholdsvis 82 % og 84 %. Takrute C har et noe lavere maksimum på 71 %, men takrute D oppnår kun en maksimal jordfuktighet på 48 %. I dette tilfellet er det jordfuktigheten i takrute A som stiger mest med 72 % og den minste jordfuktighetsstigningen foregår i takrute D med kun 37 %. Etter nedbøren er avsluttet, dreneres takrutene og jordfuktigheten reduseres. Jordfuktigheten reduseres mest og hurtigst i takrute A. Jordfuktigheten avtar betydelig mindre for de andre takrutene. Oppsummering av jordfuktighetsresultatene for denne hendelsen er vist i tabell 10.

Tabell 10: Jordfuktighetsresultater 25.juli 2014

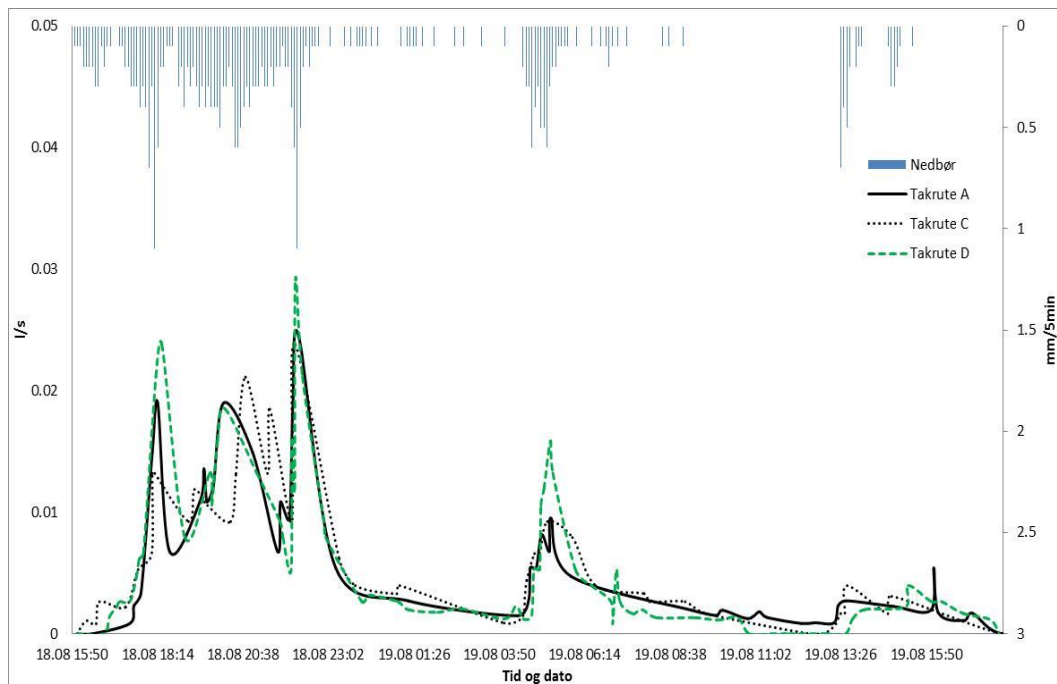
Takrute	Jordfuktighet ved start	Maksimal jordfuktighet	Stigning i jordfuktighet	Jordfuktighet ved endt periode
A	10 %	82 %	72 %	42 %
B	37 %	84 %	47 %	64 %
C	31 %	71 %	40 %	61 %
D	11 %	48 %	37 %	38 %

I dette tilfellet er det ikke vist verdier av jordtemperaturer da disse verdiene vil være av mindre betydning på denne årstiden. Kapittel 9.4 og utover omhandler tine og fryse prosesser på det grønne taket og her vil jordtemperaturrendringene være av en større betydning.

9.2 18.august til 20.august 2014

Denne hendelsen består av gjentatte episoder med regn over to dager der den gjeldende nedbøren registreres 18.august kl. 15:46 og avsluttes 19.august kl. 15:18, men avrenningen fra takrutene foregår frem til 20.august. Den gjennomsnittlige lufttemperaturen i dette tidsrommet var på ca. 12 °C. Før den gjeldende nedbøren inntreffer, er det registrert enkelte nedbørmålinger fra og med 17.august og frem til 18.august kl. 10:55 med en total mengde på 10,5 mm. Dette gjør at jordfuktigheten til de forskjellige takrutene er noe forhøyet ved oppstart av den aktuelle nedbørhendelsen. Denne nedbørhendelsen har en blanding av lav intens nedbør i starten med mer intens nedbør utover. En grafisk fremstilling av avrenningen

fra de ulike takrutene samt nedbøren fra og med 18.august kl. 15:46 og utover er vist i figur 29.



Figur 29: Avrenningskurver for takrute A, C og D 18.august 2014

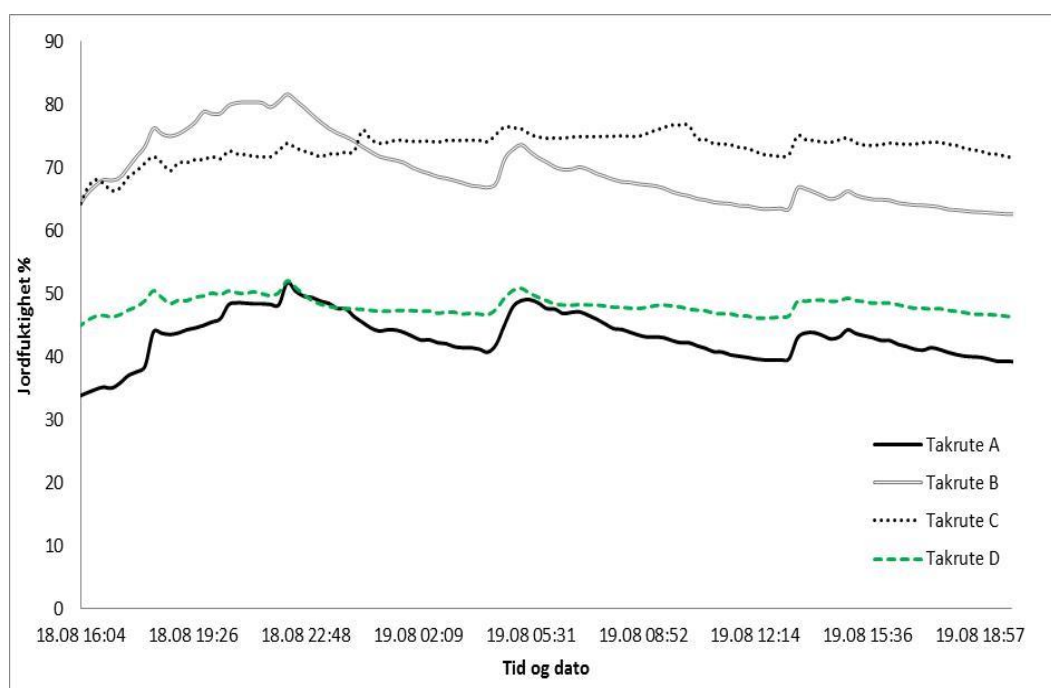
Av ukjente årsaker har det oppstått en feil i avrenningsmålingen fra takrute B for hele august måned og dermed er ikke avrenningen fra takrute B tatt med i betraktningen. Den totale mengden nedbør for denne perioden er på 34,9 mm. Avrenningen fra takrutene foregår over ca. 24 timer da det oppstår flere enkelte nedbørhendelser med korte mellomrom slik at avrenningen til karene foregår kontinuerlig uten stans.

I dette tilfellet er jordfuktighet til de ulike takrutene noe forhøyet ved start og dette bidrar til at avrenningen fra takrutene inntreffer noe hurtigere og avrenningen er i større grad påvirket av nedbørkarakteristikken. Fra figur 29 er det en stor korrelasjon mellom nedbørens intensitet og avrenningsintensiteten fra takrutene. Avrenningen fra takrute A, C og D starter henholdsvis etter 39 min, 45 min og 46 min, men avrenningsintensiteten fra takrute A stiger noe mer langsomt enn de andre takrutene som vist i figur 29. Det er ikke en tydelig forskjell mellom avrenningen fra de forskjellige takrutene i dette tilfellet, men takrute D oppnår de største avrenningstoppene. Takrutene tilbakeholder kun 1,4 mm til 1,7 mm nedbør før avrenningen registreres. I dette tilfellet oppnår takrute D den største reduseringen av nedbørvolumet på 23 %. En oppsummering av avrenningsresultatene for denne hendelsen er vist i tabell 11.

Tabell 11: Avrenningsresultater fra nedbørhendelsen 18.august 2014

Takrute	Start av avrenning etter nedbørstart	Tilbakeholdt mm før avrenning	Redusering av nedbørtopp	Forskyvning av nedbørtopp	Redusert volum
A	39 min	1,4 mm	61 %	239 min	18,7 %
B	-	-	-	-	-
C	45 min	1,7 mm	65 %	243 min	18,7 %
D	46 min	1,7 mm	62 %	281 min	23,0 %

Figur 30 viser endringene av jordfuktighet for de ulike takrutene gjennom denne hendelsen. I dette tilfellet er jordfuktigheten til takrutene av betydning for reduisering og fordrøyning av nedbøren. Jordfuktigheten til takrute A, B, C og D før nedbøren inntreffer er på henholdsvis 34 %, 64 %, 65 % og 45 %. I forhold til forrige nedbørhendelse som inntraff 25.juli, er dette over en dobling av jordfuktigheten som en startbetingelse før nedbøren inntreffer. Dette forårsaker dermed en betydelig økning av det avrente volumet fra takrutene og avrenningen starter nesten momentant etter nedbøren inntreffer. Fra figur 30 ser man at jordfuktigheten er størst for takrute B og C. Takrute A og D har ca. 25 % lavere jordfuktighet enn takrute B og C gjennom denne hendelsen. Jordfuktigheten til takrutene varierer minimalt gjennom denne hendelsen, men jordfuktigheten varierer mest for takrute A og B.



Figur 30: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 18.august 2014

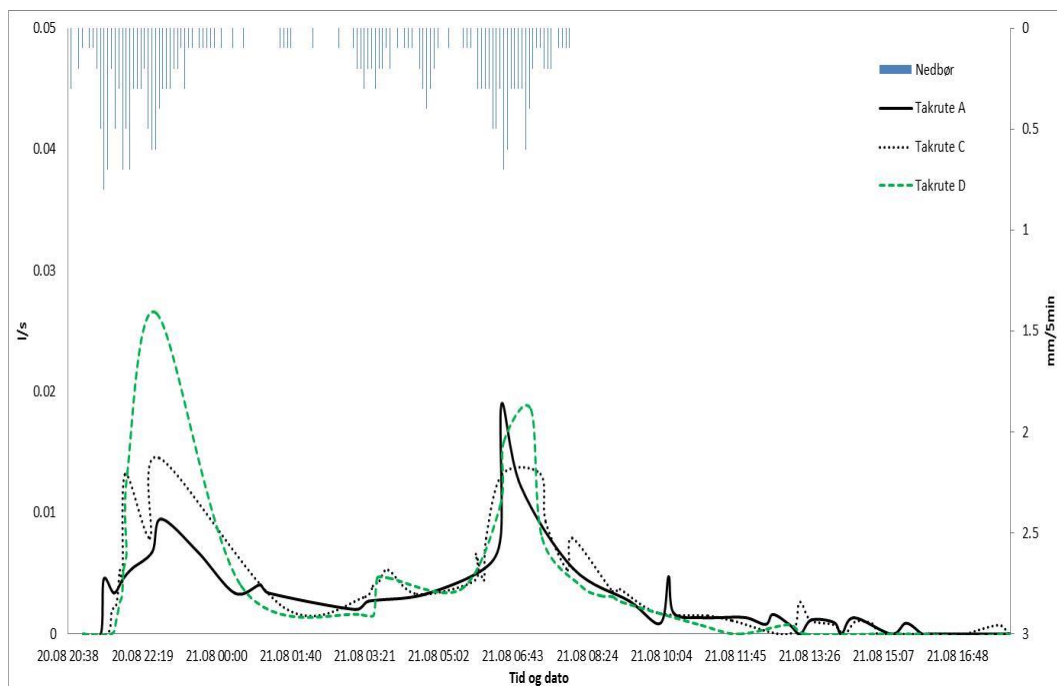
En oppsummering av jordfuktighetsverdiene for denne hendelsen er gitt i tabell 12.

Tabell 12: Jordfuktighetsresultater 18.august 2014

Takrute	Jordfuktighet ved start	Maksimal jordfuktighet	Stigning i jordfuktighet	Jordfuktighet ved endt periode
A	34 %	52 %	18 %	39 %
B	64 %	82 %	18 %	63 %
C	63 %	77 %	14 %	72 %
D	45 %	52 %	7 %	46 %

9.3 20.august til 21.august 2014

I denne perioden oppstår det flere enkelte nedbørhendelser slik at avrenningen fra takrutene foregår kontinuerlig med noen variasjoner i avrenningsintensiteten over 2 døgn. Den gjennomsnittlige lufttemperaturen i dette tidsrommet er også på ca. 12 °C. Den totale nedbørmengden er på 24,3 mm. Denne langvarige nedbørhendelsen er en fortsettelse av forrige nedbørhendelse som avsluttet 19.august og dermed er jordfuktigheten til takrutene noe forhøyet ved oppstart. Dette gjør at den registrerte avrenningen fra takrute A, C og D inntreffer etter henholdsvis 29 min, 53 min og 28 min. I dette tilfellet er det en tydeligere forskjell mellom avrenningen fra de forskjellige takrutene under den første bygen. Under den første bygen stiger avrenningsintensiteten fra takrute D betydelig hurtigere enn både takrute A og C, men etter bygen jevnes forskjellen ut.



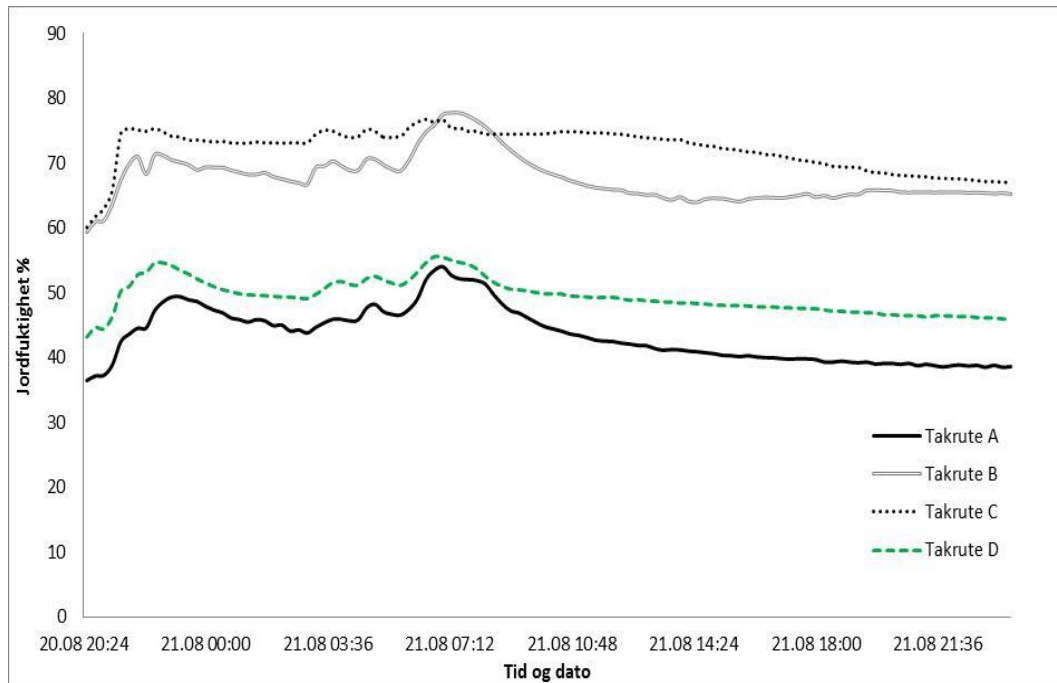
Figur 31: Avrenningskurver for takrute A, C og D 20.august 2014

Den maksimale nedbørintensiteten finnes i den første bygen som inntreffer og takrute D er sterkt påvirket av denne. Dette gjør at den maksimale nedbørtoppen er kun forsinket med 1 time og 15 minutter for takrute D. Den maksimale avrenningen fra takrute A og C inntreffer ved den andre bygen. Grunnet en forhøyet jordfuktighet i takrutene er det tilbakeholdt kun 0,7 mm til 2,7 mm av nedbøren før avrenning registreres. I dette tilfellet reduserer takrute A både nedbørvolumet og nedbørtoppen mest med henholdsvis 29 % og 62 %. En oppsummering av avrenningsresultatene er gitt i tabell 13.

Tabell 13. Avrenningsresultater fra nedbørhendelsen 20.august 2014

Takrute	Start av avrenning etter nedbørstart	Tilbakeholdt mm før avrenning	Redusering av nedbørtopp	Forskyvning av nedbørtopp	Redusert volum
A	29 min	0,7 mm	62 %	9 timer og 7 min	29 %
B	-	-	-	-	-
C	53 min	2,7 mm	58 %	9 timer og 45 min	21 %
D	28 min	0,7 mm	47 %	1 time og 15 min	24 %

Jordfuktigheten for de forskjellige takrutene i dette tilfellet har samme trend som forrige nedbørhendelse 18.august der jordfuktigheten ved oppstart er størst for takrute B og C. Jordfuktigheten varierer mest for takrute A og B som vist på figur 32.



Figur 32: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 20.august 2014

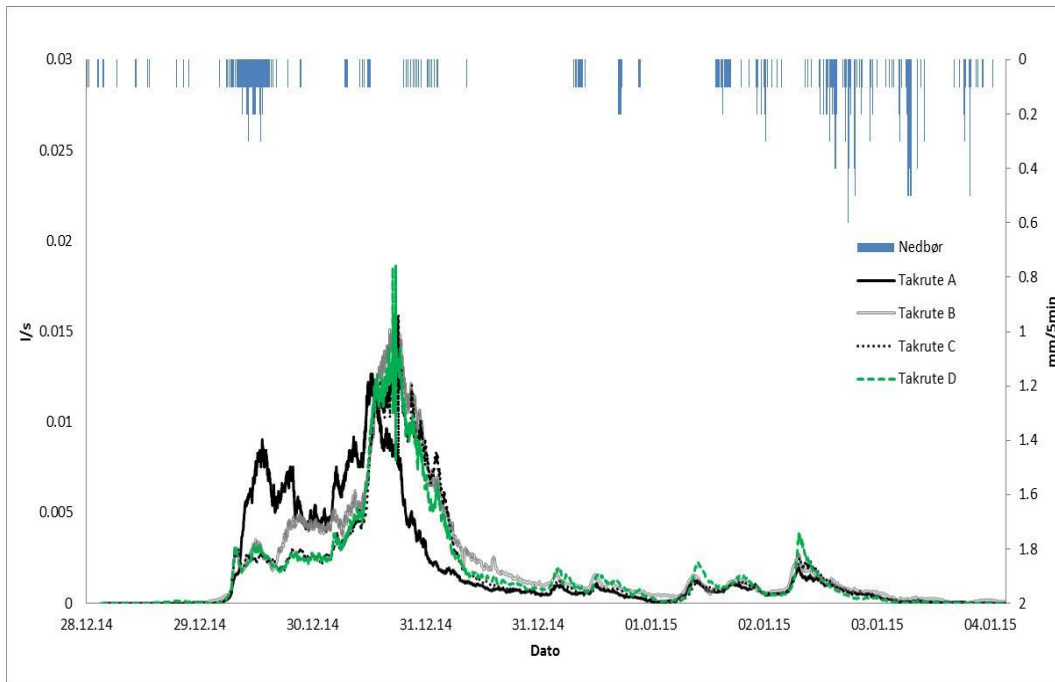
Jordfuktigheten stiger mest for takrute A og minst for takrute D, og etter nedbørhendelsen dreneres takrutene ned til en jordfuktighetsverdi tilnærmet lik jordfuktigheten ved oppstart. En oppsummering av jordfuktighetsverdiene for de ulike takrutene er vist i tabell 14.

Tabell 14: Jordfuktighetsresultater 20.august 2014

Takrute	Jordfuktighet ved oppstart	Maksimal jordfuktighet	Stigning i jordfuktighet	Jordfuktighet ved endt periode
A	36 %	54 %	18 %	39 %
B	59 %	78 %	19 %	65 %
C	60 %	77 %	17 %	67 %
D	43 %	56 %	13 %	46 %

9.4 28.desember 2014 til 4.januar 2015

Denne nedbørhendelsen kan bestå av både nedbør i form av snø, regn eller en kombinasjon av begge. Den registrerte nedbørmengden er på totalt 50,5 mm for hele perioden og nedbørintensiteten er minimal. Dette gjør at avrenningen fra takrutene er dominert av snøsmelting. Dermed er det i dette tilfellet kun fokusert på hvordan de forskjellige takrutene håndterer snøsmelting med vekslende temperaturer. En helhetlig oversikt over hele perioden er vist i figur 33.



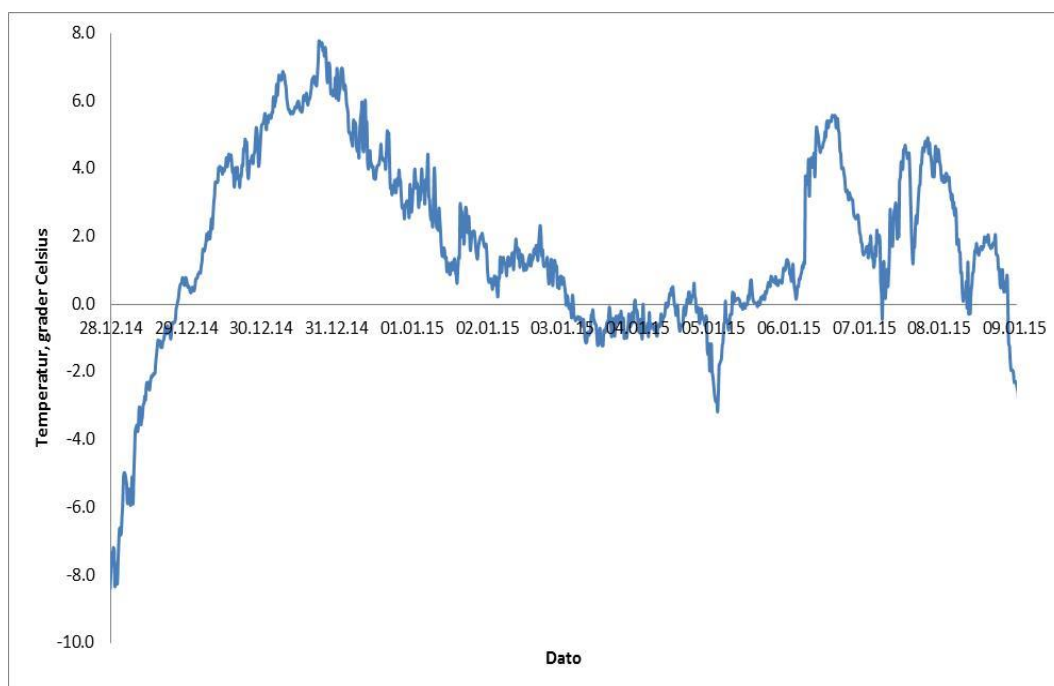
Figur 33: Avrenningskurver for de ulike takrutene i perioden 28.desember 2014 til 4.januar 2015

Fra figur 33 er avrenningen fra takrutene størst i perioden 29. desember til 31. desember 2014, men nedbøren har sitt største omfang i perioden 2. januar til 4. januar 2015. Dette viser at nedbøren er av minimal betydning for avrenningen fra takrutene og snøsmeltingen er dominerende. Fra figur 33 øker og opprettholdes avrenningsintensiteten fra takrute A mest, men den maksimale avrenningstoppen som inntreffer er noe lavere enn for de andre takrutene. Takrute B, C og D har store likheter i avrenningen der avrenningsintensiteten oppnår et noe større maksima enn takrute A. Avrenningen fra takrute B, C og D avtar også noe mer langsomt og avrenningstoppen inntreffer på et senere tidspunkt. Det avrente volumet er tilnærmet likt mellom alle takrutene men takrute B oppnår den største avrenningen på 1,546 m³ og avrenningen registreres tidligst. En oppsummering av avrenningsresultatene for denne hendelsen er vist i tabell 15.

Tabell 15: Avrenningsresultater for de ulike takrutene 28.desember 2014 til 4.januar 2015

Takrute	Start av avrenning fra snøsmelting	Maksimal avrenning	Inntreffende avrenningstopp	Avrent volum
A	kl. 12:48	0,0163 l/s	30.12 kl. 16:09	1,356 m ³
B	kl. 12:10	0,0187 l/s	30.12 kl. 19:12	1,546 m ³
C	kl. 12:31	0,0185 l/s	30.12 kl. 20:15	1,289 m ³
D	kl. 12:50	0,0185 l/s	30.12 kl. 19:43	1,306 m ³

Avrenningen og snøsmeltingen fra takrutene er sterkt påvirket av lufttemperaturene og solinnstrålingen på taket. Som nevnt tidligere er taket rettet mot syd. Den varierende lufttemperaturen gitt i grader Celsius for denne hendelsen er som vist i figur 34.



Figur 34: Lufttemperaturen gjennom perioden 28.desember 2014 til 4.januar 2015

Fra figur 34 stiger lufttemperaturen mot plussgrader 29.desember kl. 06:15 og lufttemperaturen oppnår en maksimumstemperatur på 7,8 °C 31.desember kl. 03:45 før temperaturen avtar. Det er en stor korrelasjon mellom lufttemperaturen og snøsmeltingen fra takrutene. Snølagringen og snøsmeltingen i denne perioden er vist i figur 35 og 36 av to automatiske fotografier fra forskningsanlegget.



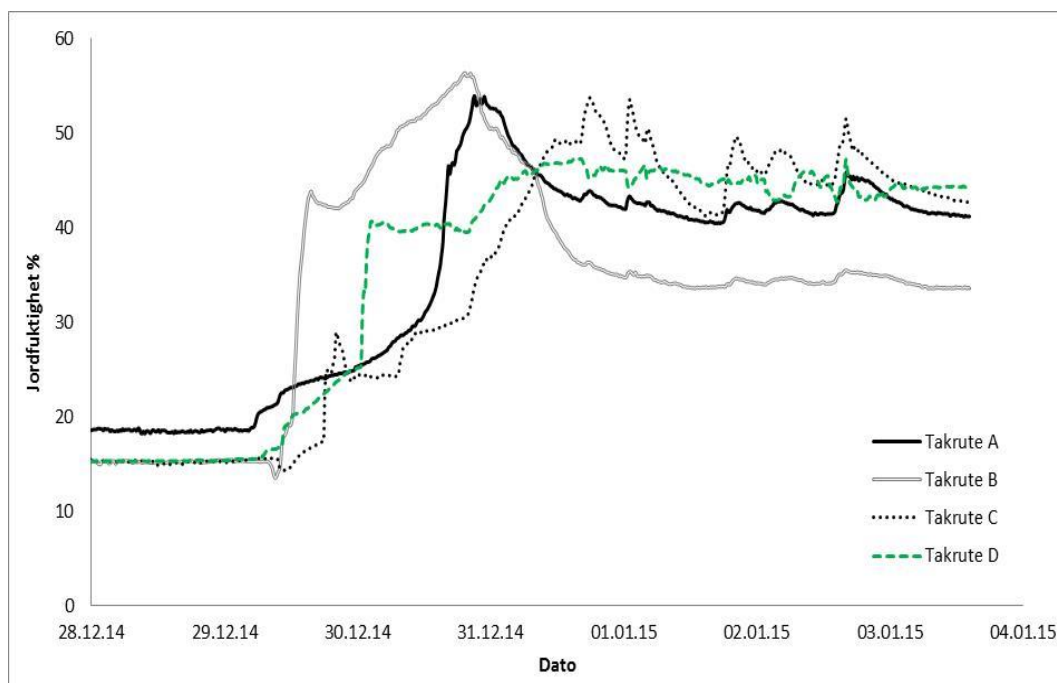
Figur 35: Snømengde på taket før snøsmelting



Figur 36: Snømengde etter snøsmelting

På figur 35 er det vist snømengden på taket 29. desember 2014 kl. 11:00 før snøsmeltingen inntreffer og på figur 36 er det vist snømengden på taket 31. desember 2014 kl. 15:00 etter snøsmeltingen er avsluttet. Snødybden på taket ved dette tidspunktet er ukjent, men ut fra fotografiet og tidligere målinger er snødybden på minst 40 mm etter som snødybden dekker over beslagskanten rundt taket

Jordfuktigheten for de ulike takrutene i denne perioden varierer som vist i figur 37.



Figur 37: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 28. desember 2014 til 4. januar 2015

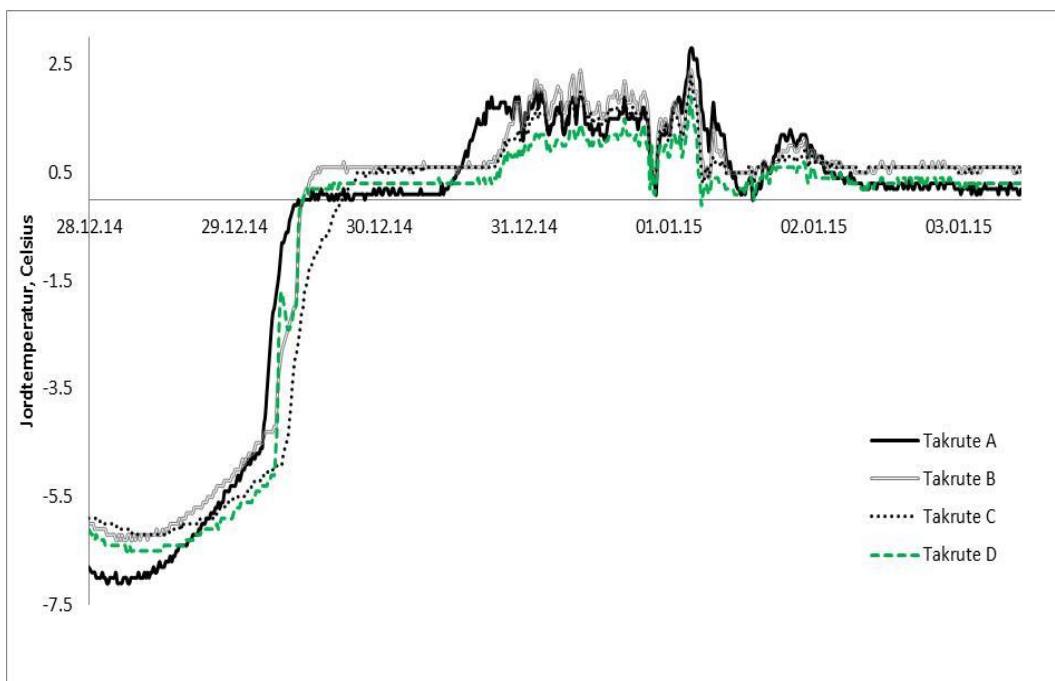
Fra figur 37 øker jordfuktigheten i takrute B hurtigst når snøsmeltingen inntreffer, men den dreneres også hurtigst etter avrenningen er avsluttet. Jordfuktigheten til de ulike takrutene er

tilnærmet like ved oppstart før snøsmeltigen inntreffer, men i motsetning til andre perioder med høyere lufttemperaturer, er jordfuktigheten ved start og den maksimale jordfuktigheten for alle takrutene betydelig lavere. De maksimale jordfuktighetene er tilnærmet likt for alle takrutene, men takrute B har den laveste jordfuktighet ved endt avrenning. Jordfuktigheten øker tregest for takrute C. En oppsummering av jordfuktighetene for denne perioden er gitt i tabell 16.

Tabell 16: Jordfuktighetsresultater 28.desember 2014 til 4.januar 2015

Takrute	Jordfuktighet ved start	Maksimal jordfuktighet	Stigning i jordfuktighet	Jordfuktighet ved endt periode
A	19 %	54 %	35 %	41 %
B	15 %	79 %	64 %	33 %
C	15 %	86 %	71 %	43 %
D	15 %	74 %	59 %	44 %

Takrutene i denne perioden gjennomgår både fryse- og tineprosesser og jordtemperaturrendringene for de ulike takrutene i dette tilfellet er vist i figur 38.



Figur 38: Jordtemperaturen i de forskjellige takrutene 28.desember 2014 til 4.januar 2015

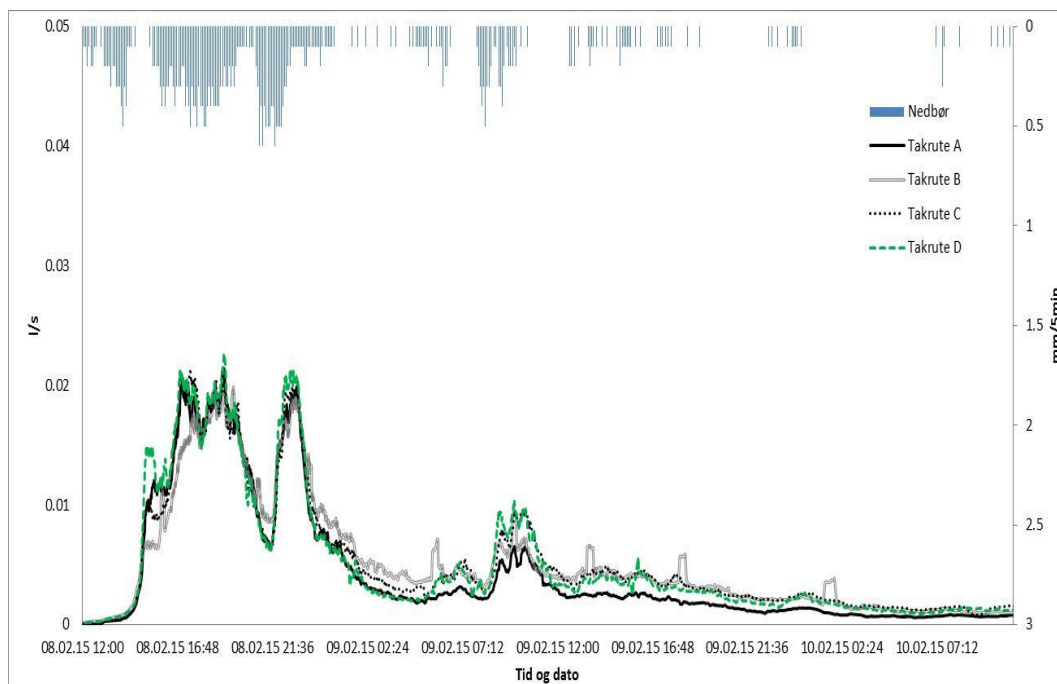
I starten av denne hendelsen registreres den laveste jordtemperaturen i takrute A.

Jordtemperaturen stiger med lufttemperaturen og den 29.12 ca. kl. 20:45 oppnår substratene

plussgrader. Det er minimale forskjeller mellom jordtemperaturene for de ulike takrutene, men jordtemperaturen i takrute A stiger hurtigst. Snøsmeltigen fra takrutene foregår dermed ved plussgrader i substratlagene.

9.5 8.februar til 10.februar 2015

Denne hendelsen består også av nedbør i form av snø, regn eller en kombinasjon av begge og avrenningen fra takrutene foregår kontinuerlig over 3 døgn. Den registrerte nedbørmengden er på totalt 53,2 mm for hele perioden og i dette tilfellet er avrenningen fra takrutene i sterkere grad påvirket av nedbøren som vist på figur 39. I dette tilfellet er det minimale forskjeller mellom avrenningen fra de ulike takrutene. avrenningsgrafene strekker seg over 3 døgn og dette gjør at startpunktet for når avrenning fra de ulike takrutene inntreffer er noe misvisende. Ut fra figur 39 ser det ut til at avrenningen fra takrutene starter på samme tidspunkt, men de første registrerte avrenningene fra takrutene er som vist i tabell 17. Fra figur 39 er det en korrelasjon mellom nedbørens intensitet og avrenningsintensiteten fra takrutene. Det inntreffer flere avrenningstopper i denne hendelsen og generelt er det minimale forskjeller mellom avrenningstoppene til de ulike takrutene, men takrute D oppnår de største avrenningstoppene. Det totale avrente volumet er mest redusert av takrute A i dette tilfellet.



Figur 39: Avrenningskurver for de ulike takrutene 8.februar til 10.februar 2015

Det registreres en umiddelbar avrenning fra takrute C i denne hendelsen og avrenningen fra takrute D starter på et betydelig senere tidspunkt. Men etter som avrenningen fra takrutene er sterkt påvirket av snøsmelting, vil årsaken til dette innebære noen usikkerheter.

Smelteprosessen av snø på det grønne taket er som vist i figur 40. Fra figur 40 er det tatt to fotografier fra det grønne taket den 8.februar 2015 kl. 11:00 og kl. 15:00 samme dag.

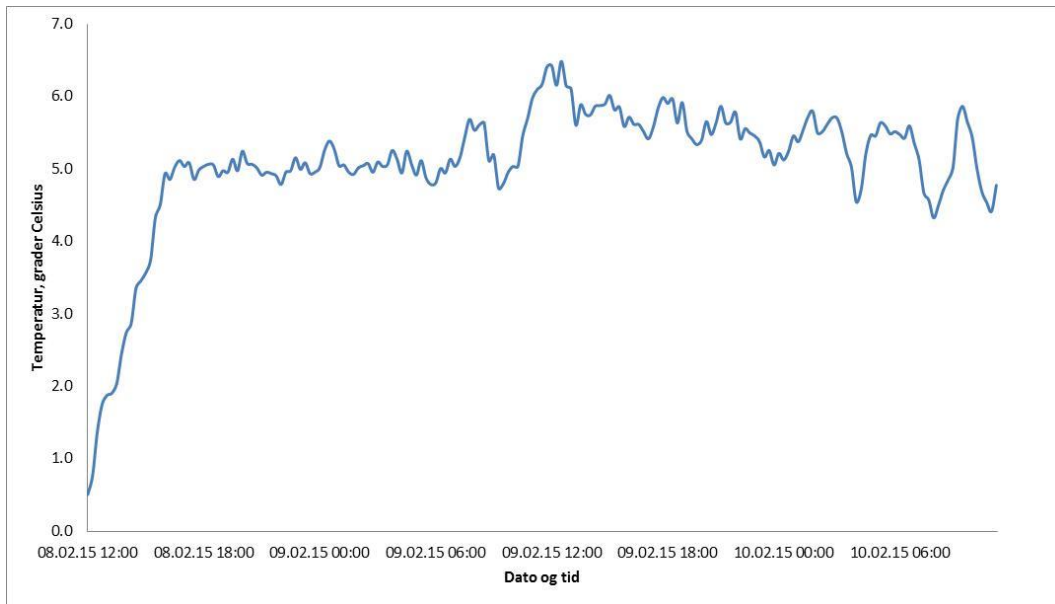
Tabell 17: Avrenningsresultater for de ulike takrutene 8.februar til 10.februar 2015

Takrute	Start av avrenning etter nedbørstart	Maksimal avrenning	Tilbakeholdt volum
A	89 min	0,0163 l/s	+ 8,4 %
B	50 min	0,0187 l/s	- 9,4 %
C	0 min	0,0185 l/s	- 13,4 %
D	475 min	0,0185 l/s	- 9,6 %



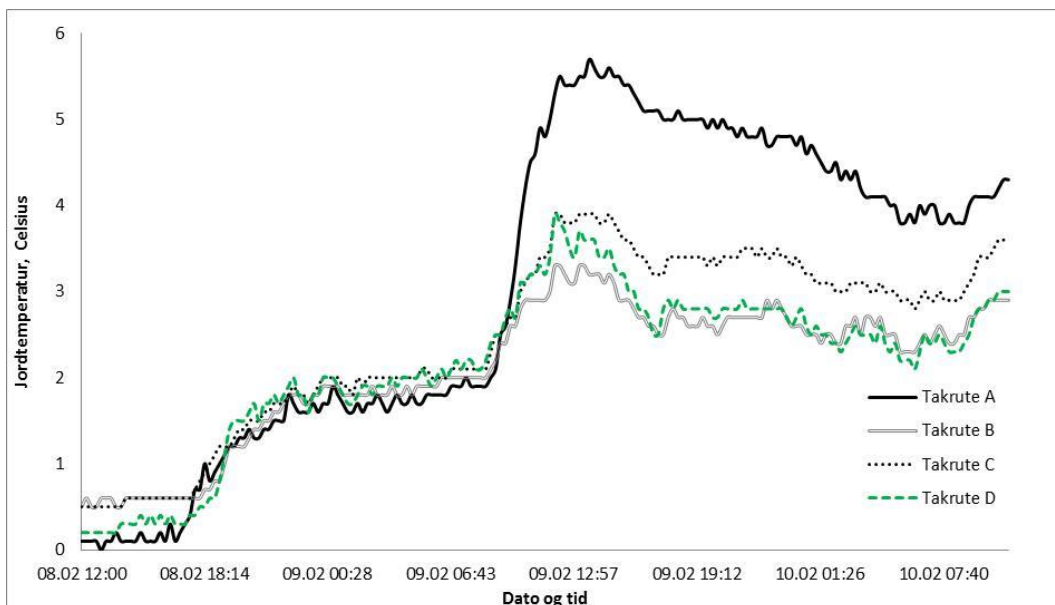
Figur 40: a) Snømengde på taket før snøsmelting og b) snømengde etter snøsmelting

Snødybden på taket ved dette tidspunktet er ukjent, men ut fra fotografiet og tidligere målinger er snødybden på minst 40 mm etter som snødybden dekker over beslagskanten rundt taket. Fra figur 40 ser det ut til at det har smeltet mest snø fra takrute A, men ut fra beregningene vist i tabell 17 er det en større tilbakeholdelse av overvannet fra denne takruten. Den gjennomsnittlige lufttemperaturen i denne perioden er på 5,1 °C og lufttemperaturens variasjoner gjennom perioden er vist i figur 41.



Figur 41: Lufttemperaturen i perioden 8.februar til 10.februar 2015

Fra figur 41 stiger lufttemperaturen fra 0,5 °C kl. 12:00 til 5 °C kl. 16:45 og det er i dette tidsrommet avrenning fra takrutene starter som vist i figur 39. Når snø lagres på taket, minker jordtemperaturene til de grønne takene nå de kommer i kontakt. Jordtemperaturens forløp i denne perioden er vist i figur 42.



Figur 42: Jordtemperaturen for de ulike takrutene 8.februar til 10.februar 2015

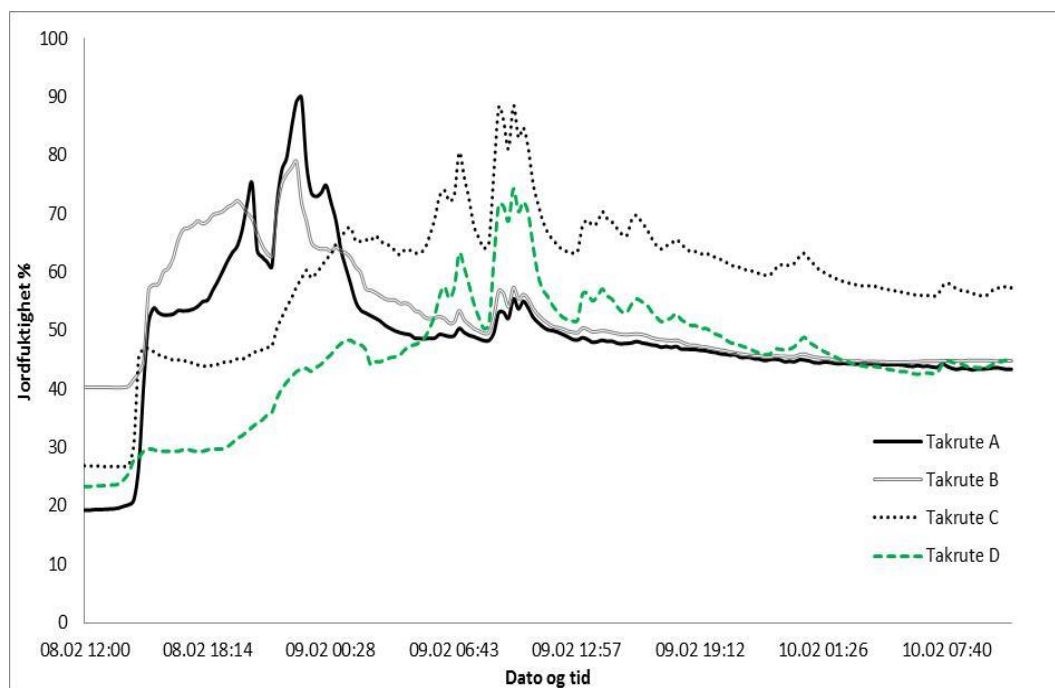
Fra figur 42 er jordtemperaturene lave nok til å gjennomgå fryse og tineprosesser. Den laveste jordtemperaturen registreres på 0 °C i takrute A før nedbøren inntreffer, varme overføres ved konduksjon og temperaturene i jordsubstratene stiger. Jordtemperaturene for alle takrutene følger en tilnærmet lik trend frem til 9.februar kl. 10:00 der jordtemperaturen i takrute A øker

betraktelig mer enn de andre takrutene. En oppsummering av jordtemperaturene for denne hendelsen er gitt i tabell 18.

Tabell 18: Jordtemperaturene til de ulike takrutene i perioden 8.februar til 10.februar 2015

Takrute	Jordtemperatur ved start	Maksimal jordtemperatur	Jordtemperatur ved endt nedbør
A	0,1 °C	5,7 °C	4,3 °C
B	0,5 °C	3,3 °C	2,9 °C
C	0,5 °C	3,9 °C	3,6 °C
D	0,2 °C	3,9 °C	3,0 °C

Endringene av jordfuktigheten til de ulike takrutene for denne hendelsen er som vist i figur 43.



Figur 43: Jordfuktighetsmålingene i de forskjellige takrutene 8.februar til 10.februar 2015

Ut fra tidligere observeringer er også jordfuktigheten i takrute B og C noe forhøyet i forhold til takrute A og D før nedbøren inntreffer, men i dette tilfellet er jordfuktigheten i takrute C betydelig større enn for de andre takrutene før nedbøren inntreffer. Jordfuktigheten stiger hurtigst for takrute A og B, den maksimale jordfuktigheten oppnås på et tidligere tidspunkt enn takrute C og D, men jordfuktigheten avtar tidligere. En oppsummering av jordfuktighetsverdiene for de forskjellige takrutene i denne hendelsen er vist i tabell 19.

Det kan også antas at takrute A og C oppnår en jordfuktighet tilnærmet full metning i dette tilfellet med en kombinert effekt av både snøsmelting og nedbør.

Tabell 19: Jordfuktighetsresultatene 8.februar til 10.februar 2015

Takrute	Jordfuktighet ved start	Maksimal jordfuktighet	Stigning i jordfuktighet	Jordfuktighet ved endt periode
A	19 %	90 %	71 %	43 %
B	40 %	79 %	39 %	45 %
C	27 %	89 %	62 %	57 %
D	23 %	74 %	51 %	45 %

9.6 Oppsummering av avrenningsresultatene

Ut fra den begrensede mengden data i dette prosjektet er det generelt en stor likhet i avrenningsresultatene fra de ulike takrutene. Avrenningsresultatene varierer fra nedbørhendelse til nedbørhendelse og avrenningsmengden er påvirket av sesongen. En større andel av nedbørmengden er tilbakeholdt på sommeren enn på høsten og vinteren. Det er ikke en tydelig forskjell mellom avrenningsresultatene fra takrutene og et eksempel på dette er at nedbørmengden ble redusert mest i takrute A 20.august 2014 med henholdsvis 29 %, men 18.august 2014 ble nedbørmengden fra takrute A redusert minst med henholdsvis 18 %. Det er også en minimal forskjell av når avrenningen fra de forskjellige takrutene starter, størrelsen på avrenningstoppene og fordrøyningen av disse. Disse forskjellene blir også betydelig mindre i vinterperioder ved lufttemperaturer under 5 °C der snøsmelting er dominerende.

En tydeligere forskjell mellom takrutene inntreffer ved analysering av jordtemperaturene og jordfuktighetene til de ulike takrutene. En trend som gjengis ofte er en større jordfuktighet i takrute B og C enn takrute A og D før en nedbørhendelse inntreffer. Det vil si at takrute B og C er i større grad mett før nedbøren inntreffer og vil dermed ha et mindre tilgjengelig porevolum for lagring av vann. Jordfuktigheten varierer mest for takrute A og B, men for perioder med en gjennomsnittlig lufttemperatur over 5 °C, stiger og avtar jordfuktigheten hurtigere for takrute A enn for de andre takrutene. Ved lavere temperaturer dreneres jordfuktigheten i takrute A mindre hurtig. I perioden desember 2014 til februar 2015 er jordtemperaturen i de ulike takrutene av en større betydning og generelt er jordtemperaturen i takrute A lavest i perioder med lufttemperaturer under frysepunktet. Jordtemperaturen varierer derimot mest i takrute A ved varierende lufttemperaturer både over og under frysepunktet.

En oppsummering av det totale reduserte nedbørvolumet gjennom hele prosjektperioden samt de månedlige nedbørmengdene er vist i tabell 20.

Tabell 20: Den prosentlige redueringen av nedbørmengdene fra de ulike takrutene gjennom prosjektets periode

Måned	Nedbør	Takrute A	Takrute B	Takrute C	Takrute D
Juli 2014	44,9 mm	33,1 %	54,4 %	67,6 %	68,3 %
August 2014	109,6 mm	25,8 %		20,1 %	23,6 %
Desember 2015	55,5 mm	- 18,6 %	- 35,8 %	- 11,8 %	- 8,8 %
Januar 2015	45 mm	31,1 %	20,9 %	22,2 %	8,2 %
Februar 2015	86,9 mm	20,2 %	- 2,1 %	2,2 %	0,3 %
Mars 2015	46,8 mm	58,7 %	36,7 %	39,2 %	41,2 %
April 2015	88,0 mm	52,6 %	38,2 %	42,9 %	46,5 %
Mai 2015	27,7 mm	92,3 %	65,9 %	65,3 %	74,3 %
	504,4 mm	36,9 %	25,4 %	31,0 %	31,7 %

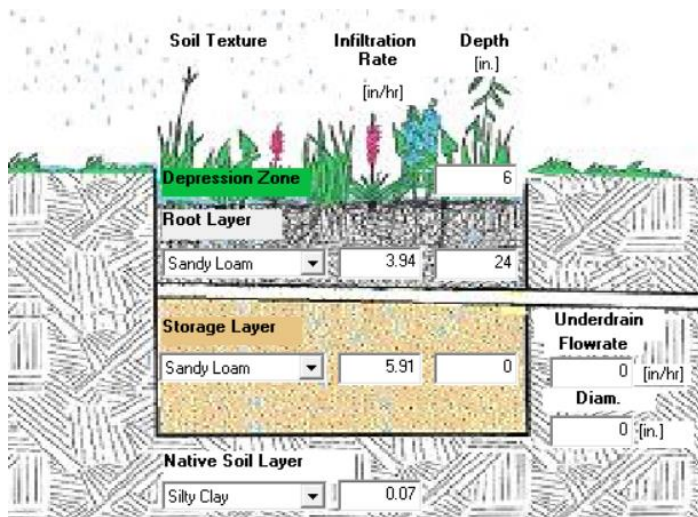
I tabell 20 er det ikke tatt med avrenningsresultater for takrute B i august måned og avrenningsresultater fra alle takrutene i perioden september til november 2014 er også unngått da det oppstod feilmålinger i trykksensorene. Resultatene fra juli måned gjelder kun fra og med 17.juli og utover.

Fra tabell 20 reduseres nedbørmengden mest i sommerperioden og minst ved høst og vinteren. Det totale gjennomsnittlige reduserte nedbørvolumet i prosjektets periode for de forskjellige takrutene er på 36,9 %, 25,4 %, 31,0 % og 31,7 % for henholdsvis takrute A, B, C og D.

9.7 Bruk av RECARGA som et simuleringsprogram

I denne oppgaven er det utført noen tester som ser på hvordan programmet RECARGA egner seg som et beregnings- og simuleringsverktøy for ekstensive grønne tak. RECARGA er et program som hovedsakelig er brukt til simuleringer og beregninger av overvannsmengder fra regnbed og infiltrasjonsbassenger. Modellen bruker Green and Ampt's infiltrasjonsmodell for infiltrering gjennom jordoverflaten, Van Genuchten forholdet for vannføring mellom de ulike jordlagene samt andre formler som fordampning, vannbalanse med mer. Ved simulering tar modellen hensyn til gropmagasinering på overflaten, avrenning på overflaten, infiltrasjon gjennom ulike substratlag med ulike egenskaper og vannføring ut av regnbedet. Vannføringen ut av regnbedet skjer i et rør med en gitt diameter.

Det første steget i modellen omhandler oppsamling av vann i en fordrøyningszone med en gitt dybde for tilbakeholdelse av overvann. Under overflaten er det en rotsone og en lagringssone som kan bestå av ulike jordtyper med muligheten for justering av infiltrasjonsraten og dybden på substratlaget. Under rotsonen er det et dreneringsrør for videreføring av det infiltrerte overvannet ut av anlegget. Nederst i modellen er det innfødte jordlaget med ulike valgmuligheter for jordtype, tykkelse og infiltrasjonsrate. Modellens oppbygning er vist i figur 45.

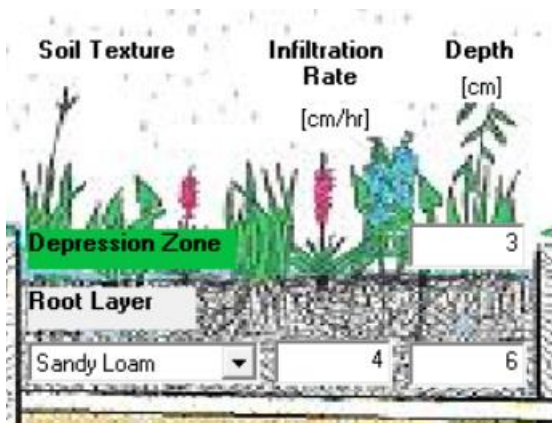


Figur 44: Oppbygningen av RECARGA

Før man starter simuleringen må man bestemme egenskapene til de ulike substratene, arealet på selve anlegget, nedbørstypen og fordampningsraten på området. Tilstøtende arealer og prosentandelen av tette flater sees bort fra. For optimale resultater er det nødvendig å legge inn en egen fil med nedbør- og fordampningsdata fra det aktuelle området. I RECARGA er

nedbørmengdene gitt med tidsintervaller på én time. Ved å kjøre programmet, vil dette gi resultater som overflateavrenning, infiltrasjon, evapotranspirasjon, drenering med mer.

Ved simulering av avrenningsprosesser fra grønne tak er det i dette tilfellet valgt å avgrense modellen der det er sett bort fra lagringssonen og det innfødte jordlaget. Dette er gjort for å få en forenklet utgave av oppbygningen til et grønt tak samt unngå unødvendige prosesser som kan være misvisende. Det er også lagt ved egne filer med nedbørdata fra forskningsanlegget på Risvollan der nedbørmengdene er summert opp fra tidsintervaller på ett minutt til tidsintervaller på én time. I dette tilfellet har man kun to valgmuligheter ved valg av jordsubstrat i rotsonen, sandig leirjord eller leirjorda sand. Sandig leirjord er valgt som materiale i simuleringen da dette vil være mer tilnærmet jordsubstratet i ekstensive grønne tak enn leirjorda sand. Infiltrasjonsraten i rotsonen er antatt til å være lik 4 cm/time. Diameteren på dreneringsrøret er valgt lik 200 mm og ut fra forskjellige simuleringen var dette nok til å videreføre alt regnvannet som infiltrerte gjennom substratlaget for de mest intense nedbørhendelsene. Et eksempel av oppbygningen til RECARGA for simulering av avrenning fra grønne tak er vist i figur 46.



Figur 45: Oppbygningen av RECARGA for simulering av avrenning fra grønne tak

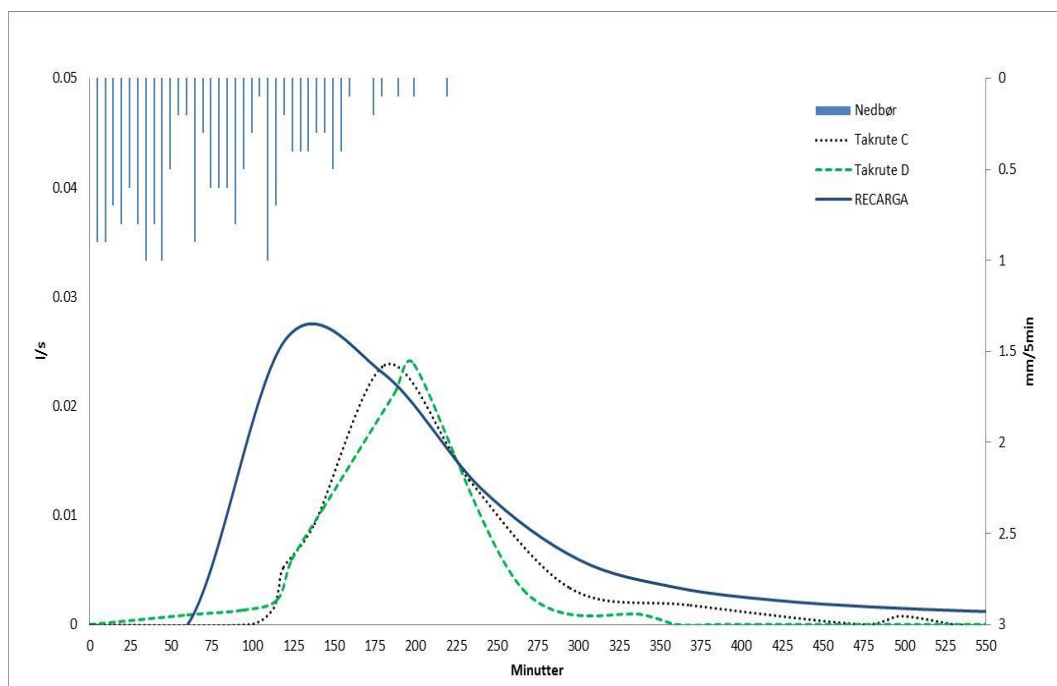
Fra figur 46 har man kun fordrøyningssonen på toppen, rotsonen under og dreneringsfunksjonen i bunn av konstruksjonen. For grønne tak har man ikke en fordrøyningssone på toppen men i bunn av konstruksjonen hvis taket består av et dreneringselement i bunn. Dreneringselementet kan være av plast med jevnt fordelte små bassenger slik at det dannes et vannreservoar for fordrøyning av store mengder overvann.

Av de aktuelle takrutene for dette prosjektet, er det valgt å bruke takrute C og D til simuleringen da disse har det tykkeste jordsubstratet og med et dreneringselement i bunn av konstruksjonen. Takrute A og B er mindre aktuelt å simulere for da de består av andre

materialer som filtduk og mineralull som ikke er representert i modellen. Det er brukt standardverdier for fordampning i RECARGA og det er kun simulert for sommer og vår perioder i Trondheim da programmet ikke tar hensyn til utfordringer som frost og is i kalde klimaer (Atchison & Severson, 2004). Dette fører til et begrenset antall aktuelle nedbørhendelser fra forsøksanlegget som kan brukes til sammenligning, men nedenfor er det presentert noen sammenligninger mellom de observerte avrenningsdata fra forskningsanlegget og de simulerte resultatene fra RECARGA. For å ta hensyn til den grove tidsopløsningen av nedbørdata i RECARGA, er det valgt et støykriterienivå på minimum 0,6. Sammenligning av ulike støykriterienivåer er som vist tidligere i figur 20 til figur 25.

9.7.1 25.juli 2014

En simulering av nedbørhendelsen 25.juli 2014 ved bruk av RECARGA og med et støykriterium på 0,6 er vist i figur 47.



Figur 46: Sammenligning av avrenningen fra observerte og simulerte data i RECARGA 25.juli 2014

Fra figur 47 stiger den simulerte avrenningen i RECARGA tidligere og hurtigere enn takrute C og D med det gitte støykriterienivået. Den maksimale avrenningsintensiteten inntreffer også på et tidligere tidspunkt og med et større maksimum enn begge takrutene. Etter den maksimale avrenningsintensiteten er nådd, avtar den simulerte avrenningen mer langsomt enn for begge takrutene. I dette tilfellet inntreffer det ingen avrenning i RECARGA før 120 minutter ut i hendelsen og ved dette tidspunktet oppnås også den maksimale

avrenningsintensiteten. Tabell 21 viser en oppsummering av avrenningsresultatene fra denne hendelsen med et større støykriterienivå enn som er vist i de tidligere avrenningskurvene.

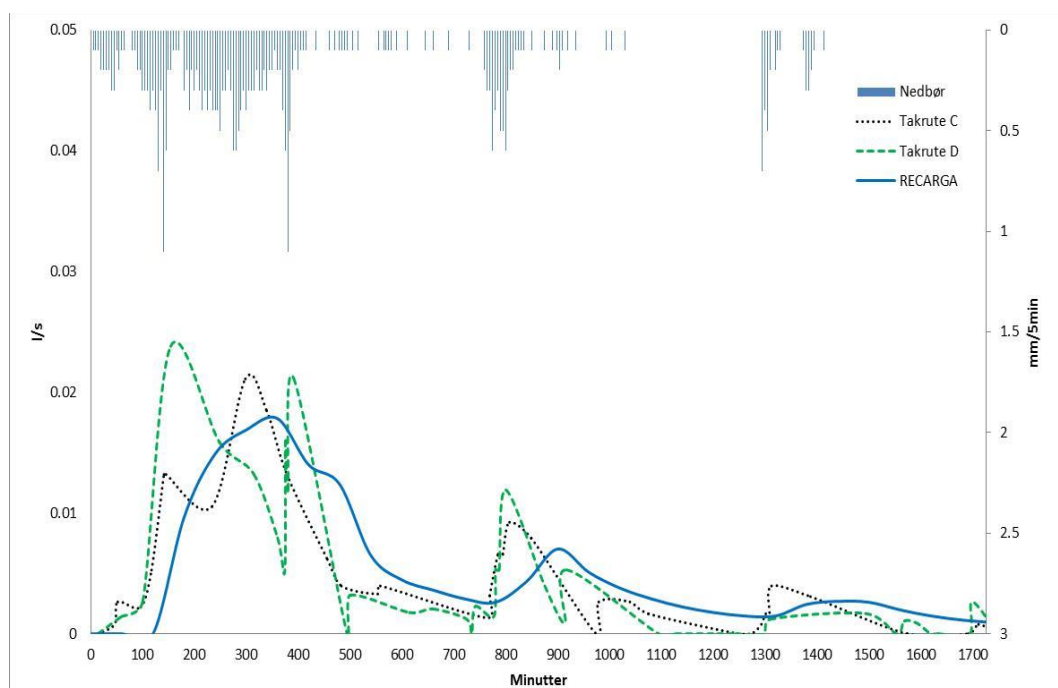
Tabell 21: Avrenningsresultater med et støykriterium på 0,6.

Data	Start av avrenning	Tidspunkt for avrenningstopp	Maksimum avrenningstopp
Takrute C	112 min	181 min	0,02381 l/s
Takrute D	60 min	199 min	0,02382 l/s
RECARGA	(120 min)	120 min	0,02607 l/s

Fra tabell 21 registreres ikke avrenningen fra simuleringen i RECARGA før etter 120 minutter, men dette er grunnet tidsopløsningen i RECARGA. Det antas at avrenning starter på et tidligere tidspunkt umiddelbart etter 60 minutter ut i hendelsen da avrenningen er registrert lik 0 l/s i dette tidspunktet. Avrenningstoppen inntreffer noe tidligere i RECARGA enn for de andre takrutene, men avrenningstoppen er kun 9 % større.

9.7.2 17.august 2014

En simulering ved bruk av RECARGA i perioden 17.august til 19.august 2014 er vist i figur 48. Dette er en langtidshendelse med mye varierende nedbør innenfor korte tidsrom. Fra figur 48 starter den simulerte avrenningen på et noe senere tidspunkt enn for de observerte dataene fra takrute C og D. I dette tilfellet er avrenningsgrafene fra takrute C og D konstruert med et støykriterium på 0,8.



Figur 47: Sammenligning av avrenningen fra observerte og simulerte data i RECARGA 17.august 2014

Fra figur 48 inntreffer det to avrenningstopper i starten av hendelsen for takrute C og D, men i dette tilfellet inntreffer det kun én avrenningstopp for den simulerte avrenningen i RECARGA. Gjennom hele hendelsen følger den simulerte avrenningen i RECARGA tilnærmet lik trend som avrenningen fra takrute C og D der avrenningsintensiteten øker når bygene inntreffer, men den simulerte avrenningen er mer jevnet ut. Tabell 22 viser en oppsummering av avrenningsresultatene for denne hendelsen.

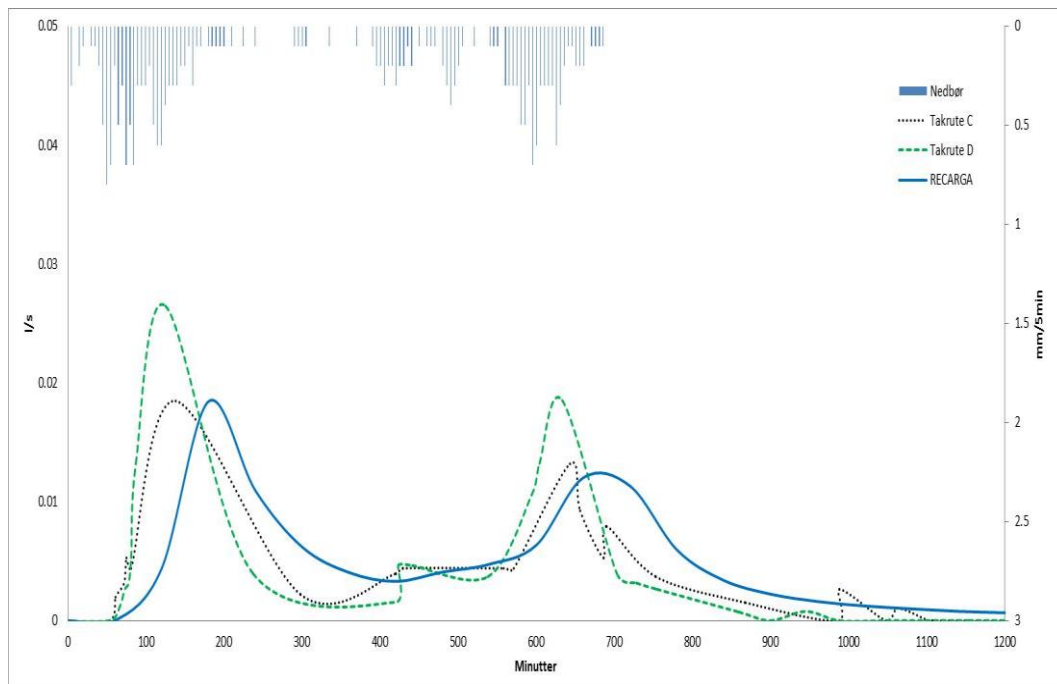
Tabell 22: Avrenningsresultater med et støykriterium på 0,8

Data	Start av avrenning	Tidspunkt for første avrenningstopp	Maksimum avrenningstopp
Takrute C	28 min	149 min	0,0212 l/s
Takrute D	45 min	143 min	0,0238 l/s
RECARGA	180 min	360 min	0,0176 l/s

Fra tabell 22 starter den simulerte avrenningen etter 180 min kontra 28 min og 45 min for henholdsvis takrute C og D. I dette tilfellet registreres det avrenning fra simuleringen i RECARGA før avrenningstoppen inntreffer. Dette er grunnet simulering over en lengre periode enn tidligere. Ut fra de konstruerte avrenningsdataene med det gitte støykriteriet, er den maksimale avrenningen fra takrute C og D på henholdsvis 0,0212 l/s og 0,0238 l/s. Dette gjør at den maksimale simulerte avrenningstoppen avviker med ca. 20 % og 35 % for henholdsvis takrute C og D. I dette tilfellet inntreffer den simulerte avrenningstoppen på et betydelig senere tidspunkt, men dette er grunnet en utjevning av avrenningstoppene i starten av hendelsen.

9.7.3 20.august 2014

Neste simulering er over perioden 20.august til 21.august 2014 der det inntreffer to avrenningstopper som vist i figur 49. I dette tilfellet inntreffer den simulerte avrenningen ca. 60 minutter etter avrenningen fra takrute C og D, men avrenningstoppene er av en mindre intensitet. I dette tilfellet er det stor likhet mellom de ulike avrenningsdataene, men avrenningsintensiteten fra simuleringen i RECARGA avtar mer langsomt enn de observerte dataene fra takrute C og D. En oppsummering av avrenningsresultatene for denne hendelsen er gitt i tabell 23.



Figur 48: Sammenligning av avrenningen fra observerte og simulerte data i RECARGA 20.august 2014

Tabell 23: Avrenningsresultater med et støykriterium på 0,8

Data	Start av avrenning	Tidspunkt for første avrenningstopp	Størrelse av første avrenningstopp	Tidspunkt for andre avrenningstopp	Størrelse av andre avrenningstopp
Takrute C	61 min	138 min	0,01848 l/s	643 min	0,01320 l/s
Takrute D	66 min	125 min	0,02646 l/s	633 min	0,01853 l/s
RECARGA	120 min	180 min	0,01843 l/s	720 min	0,01132 l/s

9.7.4 Oppsummering

RECARGA er et simulering- og beregningsverktøy egnet for regnbed og infiltrasjonsbassenger, men i dette tilfellet er det utørt simuleringen av avrenningen fra grønne tak. Ut fra sammenligningen av de observerte og simulerte avrenningsdataene, er avrenningsdataene fra simuleringen i RECARGA noe forskjellige fra de observerte dataene. Den største forskjellen mellom avrenningsdataene er forårsaket av tidsoppløsningen der de observerte dataene har en tidsoppløsning på ett minutt, men tidsoppløsningen av nedbør og avrenning i RECARGA er delt opp i tidsintervaller på én time. Dette gjør at hurtige endringer i den observerte avrenningsintensiteten blir jevnet ut i RECARGA. Det er derimot en mindre forskjell mellom avrenningsmengden og avrenningstoppene for de observerte og simulerte dataene. Denne forskjellen kan justeres og minimeres ved å utføre kalibreringer av infiltrasjonsraten til jordsubstratet i modellen og i dette tilfelle er det blitt brukt en infiltrasjonshastighet på 4 cm/time i alle simuleringene. En infiltrasjonshastighet på ca. 4 cm/time er brukt da denne gav de mest optimale resultatene for simuleringen og denne infiltrasjonsraten kan forventes i ekstensive grønne tak selv om dette vil variere betydelig fra tak til tak (Growing green guide, 2014).

I RECARGA er det noen forenklinger og begrensninger som vil kunne påvirke simuleringresultatene. Modellen tar ikke hensyn til beplantning på jordoverflaten og for ekstensive grønne tak kan typen og mengden av planter være av stor betydning for avrenningsresultatene. En forenklet mulighet som kan erstatte plantenes effekt, vil være å tilføye egnede fordampnings- og evapotranspirasjonsverdier for det aktuelle feltet man ser på. RECARGA antar også et homogent jordsubstrat som vannet infiltrerer gjennom og med kun to valgmuligheter. Dette er ikke helt optimalt da ekstensive grønne tak kan bestå av en rekke kombinasjoner av forskjellige type materialer.

Ut fra flere simuleringen og tester av avrenningsmengdene fra ulike substrattykkelser, tyder det på at resultatene fra RECARGA blir mer urealistiske ved en reduserende substrattykkelse.

Med dette gir RECARGA i de utvalgte hendelsene resultater som avviker noe fra de observerte dataene, men med noen justeringer og modifikasjoner i selve programmet kan den modifiserte utgaven utføre mer presise beregninger og simulering av avrenningen fra ekstensive grønne tak. Nedenfor er det nevnt noen forslag til endringer i modellen:

- Infiltrering gjennom jordsubstratet bør ta hensyn til varierende takvinkler. Dette kan gjøres ved bruk av den modifiserte utgaven av Green Ampt modellen for infiltrering av Li & Michael (2006).
- Mer presise metoder for beregning av fordampning og evapotranspirasjon fra ulike planter som er egnet for grønne tak
- Dokumenterte infiltrasjonsrater gjennom ekstensive grønne tak og et større utvalg av substrater
- Inkludere flere lag av andre type materialer som dreneringselementer, filtduk med mer
- Økt tidsoppløsning for nedbør og avrenning da de korte og intensive nedbørene er av størst interesse ved analysering av effekten til grønne tak.

10 Diskusjon

For å utføre et analyseringsarbeid av hydrologiske data fra forsøksanlegget på Risvollan er man avhengig av korrekte og feilfrie dataserier. Først og fremst er korrekte og feilfrie data avhengig av måleapparatenes plassering, funksjon og drift. I dette prosjektet er det data fra nedbør, jordmålere og trykksensorer som er av størst betydning. Disse måleapparatene bør kontrolleres jevnlig. Noen eksempler av hendelser som har oppstått på forsøksanlegget som kan påvirke datamålingene fra måleapparatene er jordrester i nedbørmåleren, uheldige plasseringer av jordfuktighet- og jordtemperaturmålere samt gjentettinger av jord eller andre biologiske materialer i trykksensorene.

Når måleapparatene er frie for heftelser og analyseringsarbeidet av rådata starter, vil det kreve egnede metoder for redusering av støy i dataserien. Ut fra valgt metode kan dette innebære noen unøyaktigheter og usikkerheter. Men det oppstår også usikkerheter uten redusering av støy i dataseriene. Vannstandsendingene i oppsamlingskarene er av størst betydning for analyseringsarbeidet og det er her usikkerheter kan oppstå. Som nevnt tidligere avviker målingene fra trykksensorene noe fra de observerte verdiene og antall registreringer av vannstanden i oppsamlingskaret øker med nedbørintensiteten. En økt frekvens av vannstandsmålinger vil kunne gi en økt usikkerhet, men etter som denne frekvensen øker med nedbørintensiteten og større mengder overvann tilføres til oppsamlingskarene, antas det at denne betydningen er minimal for det helhetlige resultatet. Ut fra observeringer av vannstandsmålinger i oppsamlingskarene, kan det foregå små økende og minkende variasjoner av vannstanden i perioder uten nedbør og med minimal mulighet for fordampning. Dette er forårsaket av unøyaktigheten til trykksensorene med et maksimalt avvik på +/- 3mm som nevnt tidligere. Ved lengre dataserier vil disse verdiene akkumuleres og tilsvare en overestimering av det totale avrente volumet fra takrutene, men ved bruk av algoritmen i denne oppgaven er denne overestimeringen fjernet. Ved utpumping av vann fra oppsamlingskaret oppstår det et tidsrom der avrenningen fra takrutene utelukkes. Hvis det inntreffer nedbør i det samme tidsrommet der vann pumpes ut av oppsamlingskaret, er det valgt i denne oppgaven å bruke den forrige registrerte avrenningsintensitet som en erstatning. Det antas at denne usikkerheten er minimal da en tømningshendelse som oftest ikke varer mer enn ca. 4 min.

Valg av aktuell data til fremstilling av avrenningskurver og analysering av disse innebærer noen utfordringer. Man er avhengig av å velge ut de aktuelle nedbørhendelsene manuelt selv fra dataseriene og dette kan være svært tidkrevende. Det er ønskelig å velge ut nedbørhendelser som er av en viss mengde og intensitet slik at det oppstår en tydelig avrenning fra takrutene, og til dette er man avhengig av lange tidsserier med nedbørdata.

Når de aktuelle nedbørhendelsene er valgt, må avrenningsdata reduseres for støy til grafiske fremstillinger av avrenningen fra takrutene. Det er dermed ønskelig at grafene er visuelt enkle og tydelige som mulig å se på samt at de gir korrekt informasjon om hendelsen. Dette er en utfordring å få til da disse to betingelsene motstrider hverandre. Det finnes flere fremgangsmåter for dette, men med den egenkonstruerte algoritmen for reduisering av støy i dataserien i dette prosjektet oppnås det tilfredsstillende resultater avhengig av det valgte støykriterienivået.

Ut fra avrenningsresultatene fra de ulike takrutene på forsøksanlegget kan det ikke observeres en tydelig forskjell mellom de ulike takrutene. Men store likheter i fordrøyningen og reduisering av nedbørvolumet kan være i favør for takrute A da substratet i takrute B, C og D er ca. 200 % tykkere enn substratet i takrute A. Dette tyder på at filtduken i takrute A har en god kapasitet for vannlagring i forhold til tykkelse og egenvekt. Ut fra dette vil takrute A være den foretrukne takruten da den er enklere å legge, oppbygningen er mindre kompleks, egenvekter er lav, og avrenningsresultatene er i noen tilfeller mer gunstige enn for de andre ekstensive takrutene med tykkere substrater. Dermed er takrute A i dette prosjektet av store interesse og det anbefales å utføre ytterligere tester og dataanalysingen fra denne takruten.

11 Konklusjon

Med en økende urbanisering og en endring av klimaet oppstår det utfordringer i samfunnet med tanke på håndteringen av nedbørvann. Ekstensive grønne tak kan brukes som et lokalt overvannstiltak for å imøtekomme denne utfordringen.

Hydrologiske data som nedbør og overflateavrenning består av tidsserier og prosesser som ikke er stasjonære eller lineære. Med dette kreves det egnede metoder for redusering av støy i dataseriene. I denne oppgaven er det blitt brukt en egenkonstruert algoritme i Microsoft Excel for fjerning av støy i dataseriene med tilfredsstillende resultater.

Ekstensive grønne tak har mange fordeler og noen ulemper. Ut fra en periode på 10 måneder med nedbør og avrenningsdata fra forskningsanlegget på Risvollan i Trondheim, er den gjennomsnittlige nedbørmengden redusert med 36,9 %, 25,4 %, 31,0 % og 31,7 % fra henholdsvis takrute A, B, C og D. En slik redusering av overvannsmengden vil redusere belastningen på avløpsnettet. Avrenningsmengden fra de ulike takrutene varierer også med sesongen der avrenningen er størst på vinteren og våren når snøen smelter. Men ut fra nedbørdataene er de mest intensive nedbørene på sommeren og høsten. For å sammenligne resultatene fra de ulike takrutene er det valgt ut enkelthendelser av nedbør og avrenning der avrenningsintensiteten må være av en viss størrelse og mengde før hendelsen er aktuell å analysere. Ut fra de grafiske avrenningshendelsene er det ingen tydelig forskjell mellom de ulike takrutene, men avrenningen fra takrute A inntreffer som oftest på et tidligere tidspunkt enn for de andre takrutene. Avrenningsintensiteten stiger og avtar også hurtigere, men avrenningsvolumet fra takrute A kan både underskride og overskride avrenningsvolumet fra de andre takrutene. Jordfuktigheten og jordtemperaturen varierer mest i takrute A, takrute A oppnår som oftest de største jordfuktighetsmålingene, men jordfuktigheten dreneres også hurtigst. Takrute B og C har som oftest de største jordfuktighetsverdiene før en nedbørhendelse inntreffer og er i større grad mettet på forhånd. For tydeligere sammenligningsresultater mellom de ulike takrutene, er det nødvendig med et videre arbeid og en videre analysering av fremtidige dataserier fra forskningsanlegget.

Generelt vil ekstensive grønne tak gi en fordrøyning og en reduksjon av overflateavrenningen avhengig av sesongen, og vil være godt egnet i urbane områder da ekstensive grønne tak ikke krever en ekstra arealdisponering og andelen av ubrukte takarealer i urbane områder kan tilsvare opp mot 50 % av den totale andelen impermeable overflater.

Ekstensive grønne tak krever også minimalt med vedlikehold og oppdimensjonerings av eksisterende takkonstruksjoner kan unngås.

RECARGA som et simuleringsprogram for ekstensive grønne tak gir resultater som avviker noe fra de observerte avrenningsdataene fra takrute C og D på forsøksanlegget, men med noen endringer av oppbygningen og prosessene som inngår i programmet, vil resultatene forbedres og den modifiserte utgaven kan være egnet som et simuleringsprogram for grønne tak.

12 Bibliografi

Atchison, D. & Severson, L., 2004. *RECARGA User's Manual Version 2.3*, Madison: University of Wisconsin .

Bergknapp, 2014. *Bergknapp matter*. [Internett]

Available at: <http://www.bergknapp.no/hjem/>

[Funnet 31 Oktober 2014].

Berndtsson, J. C., 2009. Ecological Engineering. *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*, 29 Desember, pp. 351-360.

Braskerud, B. C., 2014. *Grønne tak og styrtregn*, Oslo: NVE.

Bratberg, T. T. V., 2008. *Trondheim*. [Internett]

Available at: <http://www.trondheim.no/content/92936333/Klima>

[Funnet 26 Oktober 2014].

Butler, D. & Davies, J. W., 2011. *Urban Drainage*. 3 red. s.l.:Spon Press.

Chou, C. M., 2014. *Random Modeling of Daily Rainfall and Runoff Using a Seasonal Model and Wavelet Denoising*, s.l.: Hindawi Publishing Corporation.

Davis, C. V., 1942. *Handbook of applied hydraulics*. s.l.:McGraw-Hill Book Co..

De Jong, S. M. & Jetten, V. G., 2007. Estimating spatial patterns of rainfall interception from remotely sensed vegetation indices and spectral mixture analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 5 Mai, pp. 529-545.

Dingman, L. S., 2008. *Physical Hydrologi*. 2 red. s.l.:Waveland Press.

Farzaneh, R., R, J. A., D, B. R. & J, B. D., 2005. *Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species*, 17 Juli, pp. 1785-2015.

Genuchten, M. T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America journal*, pp. 892-898.

Getter, K. L., Rowe, B. D. & Andresen, J. A., 2007. *Quantifying the effect of slope on extensive*, 12 Februar, pp. 225-231.

Growing green guide, 2014. *Growing Green Guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia*, Melbourne: National Library of Australia.

Lambrecht, 2014. *Precipitation measurement*. [Internett]

Available at: <http://www.lambrecht.net/en/niederschlag/meteorologie->

[hydrologie/niederschlagsmenge/10/niederschlagssensor-nach-joss-tognini--15188- 1](http://www.lambrecht.net/en/niederschlag/meteorologie-hydrologie/niederschlagsmenge/10/niederschlagssensor-nach-joss-tognini--15188-1)

[Funnet 5 Desember 2014].

Li, C. & Michael, H. Y., 2006. Water resources research. *Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces*, 27 Juli.

- Lindholm, O. et al., 2008. *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*, Hamar: Norsk Vann.
- Mein, R. G. & Larson, C. L., 1973. Water resources research. *Modeling infiltration during a steady rain*, April, pp. 384-394.
- Mentes, J., Raes, D. & Hermy, M., 2005. Landscape and urban planning. *Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in urbanized 21st century*, 22 Februar, pp. 217-226.
- Nagase, A. & Dunnett, N., 2011. Landscape and Urban Planning. *Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure*, 11 Januar, pp. 356-363.
- Noreng, K. et al., 2012. *Grønne tak: Resultater fra et kunnskapsinnhentingprosjekt*, Oslo: Sintef Byggforsk.
- RegClim, 2014. *Regionale klimaendringer - prosjekt RegClim*. [Internett]
Available at: <http://regclim.met.no/>
[Funnet 10 Februar 2015].
- Regjeringen, 2013. *Klimatilpassing i Norge*. [Internett]
Available at: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/kld/dok/regpubl/stmeld/2012-2013/meld-st-33-20122013/1.html?id=725931>
[Funnet 25 Oktober 2014].
- Salvucci, G. D. & Entekhabi, D., 1994. Explicit expressions for Green-Ampt (delta function diffusivity) infiltration rate and cumulative storage. *WATER RESOURCES RESEARCH*, September, pp. 2661-2663.
- Schroll, E., Lambrinos, J., Righetti, T. & Sandrock, D., 2010. Ecological Engineering. *The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate*, 9 Februar, pp. 595-600.
- Sintef, 2011. *Mulighetsstudie: Solenergi i Norge*. [Internett]
Available at: <http://www.solenergi.no/wp-content/uploads/2010/01/Enova-mulighetsstudie-2011.pdf>
[Funnet 17 November 2014].
- Sintef, 2012. *Løsninger for lokal håndtering av overvann i bebygde områder*, s.l.: Byggforskserien.
- Sintef, 2012. *Vann i by - håndtering av overvann i bebygde områder*, s.l.: Byggforskserien.
- Sintef, 2013. *Sedumtak*, s.l.: Byggforskserien.
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J. & Smith, C. L., 2013. *Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof*, pp. 28-38.
- Stahre, P., 2005. Impacts of global climate change. *15 Years Experience of Sustainable Urban Storm Drainage in the City of Malmo, Sweden*, Mai, pp. 1-12.

Store Norske Leksikon, 2013. *Store Norske Leksikon*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/Risvollan>
[Funnet 10 September 2014].

Thorolfsson, S. T., 2014. *Overvannsteknologi*. s.l.:NTNU.

Vanuytrecht, E. et al., 2013. Landscape and urban planning. *Runoff and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios*, 10 Desember, pp. 68-77.

VanWoert, N. D. et al., 2005. Journal of Environmental Quality. *Green roof stormwater retention: Effects of roof surfaces, slope and media depth*, Mai, pp. 1036-1044.

Veg Tech, 2013. *Sedumtak*. [Internett]
Available at: <http://www.vegtech.se/grona-tak---gardar/sedumtak---grona-tak/>
[Funnet 31 Oktober 2014].

Villarreal, E. L. & Bengtsson, L., 2004. Ecological engineering. *Response of a sedum green-roof to individual rain events*, 16 November, pp. 1-7.

Vital vekst, 2011. *Vital vekst*. [Internett]
Available at: <http://www.vitalvekst.no/>
[Funnet 15 Februar 2015].

ZinCo, 2010. *Planlægningsguide: Ekstensiv tagbeplantning med system*, s.l.: s.n.

13 Visual Basic Algoritme

Denne koden kan ikke limes direkte inn i Microsoft Excel Visual Basic da det er flere prosesser som inngår for å få programmet til å kjøre. Koden har kun til hensikt å vise prosedyren for redusering av støy til grafiske fremstillinger. Metoden for totalbehandling av rådata er gitt i en Excel fil som et elektronisk vedlegg.

```
Dim EmptyValue As Double
```

```
Dim MaxNoise As Double
```

```
MaxNoise = 0.6
```

```
EmptyValue = 0.01
```

```
Do Until ActiveCell.Offset(1, 0).Value = ""
```

```
    If ActiveCell.Value < 0.0007 And ActiveCell.Value > 0 Then
```

```
        ActiveCell.Offset(0, 3).Value = 0
```

```
    ElseIf ((ActiveCell.Value - ActiveCell.Offset(-1, 0).Value) / (ActiveCell.Offset(-1, 0).Value)) > MaxNoise Then
```

```
        If ((ActiveCell.Offset(1, 0).Value - ActiveCell.Offset(-1, 0).Value) / (ActiveCell.Offset(-1, 0).Value)) <= MaxNoise And ((ActiveCell.Offset(1, 0).Value - ActiveCell.Offset(-1, 0).Value) / (ActiveCell.Offset(-1, 0).Value)) >= -MaxNoise Or ActiveCell.Value < -EmptyValue Or ActiveCell.Offset(-1, 0).Value < -EmptyValue Then
```

```
            Else
```

```
                ActiveCell.Offset(0, 3).Value = ActiveCell.Value
```

```
            End If
```

```
    ElseIf ((ActiveCell.Value - ActiveCell.Offset(-1, 0).Value) / (ActiveCell.Offset(-1, 0).Value)) < MaxNoise Then
```

```
        If ((ActiveCell.Offset(1, 0).Value - ActiveCell.Offset(-1, 0).Value) / (ActiveCell.Offset(-1, 0).Value)) <= MaxNoise And ((ActiveCell.Offset(1, 0).Value - ActiveCell.Offset(-1, 0).Value) / (ActiveCell.Offset(-1, 0).Value)) >= -MaxNoise Or ActiveCell.Value < -EmptyValue Or ActiveCell.Offset(-1, 0).Value < -EmptyValue Then
```

```
            Else
```

```
ActiveCell.Offset(0, 3).Value = ActiveCell.Value
```

```
End If
```

```
End If
```

```
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
```

```
Loop
```


14 Vedlegg A

Se elektronisk vedlegg.