

Hydrologisk dimensjonering av regnbed i kaldt klima

Risvollan, Trondheim

Torstein Dalen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Sveinn T Thorolfsson, IVM

Medveileder: Kim A Paus, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk

Oppgavetekst

Masteroppgave

Overvannshåndtering

2012

Masterstudent: Torstein Dalen

Tittel: Hydrologisk dimensjonering av regnbed i kaldt klima, Risvollan, Trondheim

(Eng.: Hydrologic design of Bioretention Cells in Cold Climates: A Case Study at Risvollan, Trondheim)

1. Introduksjon

Urbanisering og gjentetting av flater påvirker miljøet vårt i form av økt forurensning og økte overvannsmengder som må håndteres. Konvensjonell håndtering av overvann har vist seg verken å være særlig bærekraftig eller tilpasset norsk klima. Hvert år registreres det betydelig mengder overløpsutslipp, urbane flommer, kjelleroversvømmelser og spredning av forurensning. I tillegg forventes det, som følge av klimaendringer, at intensiteten på nedbør og frekvensen av ekstremvær vil øke i Norge i fremtiden. Mer nedbør vil medføre økt overvannsvolum, høyere flomtopper og spredning av forurensning, og derfor ytterligere legge press på en infrastruktur som allerede i dag svikter.

For å imøtekomme dagens og fremtidens utfordringer har man i stadig større grad begynt å ta i bruk metoder for overvannshåndtering der vannet håndteres og behandles lokalt ved kilden. Med en slik håndtering vil vannet forbli i området og man ivaretar/gjenopptar i større grad det naturlige hydrologiske kretsløpet som rådet før urbaniseringen. Regnbed (eng. raingardens) er en bestemt løsning innenfor denne nye filosofien som i løpet av de siste årene har blitt svært populær spesielt i USA og Canada. Regnbed er konstruert som et vegetativt bed med ett underliggende filtermedia bestående av sand og jord/matjord/kompost. Gjennom infiltrasjon i regnbedet vil vannet fordrøyes og spissvannføring reduseres. I tillegg vil naturlige biologiske, kjemiske og fysiske prosesser i regnbedet sørge for å tilbakeholde en del forurensninger og sådan også heve kvaliteten på vannet.

På tross av så langt gode erfaringer med regnbed som tiltak for overvannshåndtering, har implementering i regioner med kaldt klima uteblitt. Grunnene til dette er først og fremst mangel på erfaring og skepsis rundt ytelse som følge av redusert infiltrasjon gjennom vinteren og våren. Før regnbed kan implementeres i kaldt klima regioner er det derfor nødvendig å undersøke. Målet med denne oppgaven er derfor å undersøke den hydrologiske ytelsen til regnbed i kaldt klima, og videre foreslå spesifikke retningslinjer for dimensjonering av regnbed i Norge.

2. Oppgavemål

- Mål 1: Litteraturgjennomgang Kandidaten skal gjøre seg kjent med gjeldende litteratur på fagfeltet. Herunder, de tema og parametere som er aktuelle for å beskrive vannets vei gjennom regnbedet og i nedbørsfeltet for øvrig. Sette seg inn i RECARGA-modellen.
- Mål 2: Skrive en artikkel til magasinet Vann. Bygge videre på dokumentasjonen av regnbedet i prosjektoppgaven. Fortsette kalibrering av trykksensorer på regnbedet.
- Mål 3: Felt-forsøk. MPD-forsøk: Bygge videre på dokumentasjonen av regnbedet i prosjektoppgaven.
- Mål 4: RECARGA-modell. Bruke data fra Risvollan-regnbedet til å kalibrere modellen (både mot enkelttilfeller og over lengre perioder). Den mettede hydrauliske konduktiviteten forutsettes å være den ukjente parameteren. Sammenlikne resultatene med resultater fra MPD-forsøk.
- Mål 5: Sesong-endringer Basert på loggede data og resultater fra MPD-forsøk undersøke om det finnes sesongmessige endringer i den hydrologiske ytelsen til regnbedet, og evt. sammenlikne disse med litteratur.
- Mål 6: Designkriterier Hvordan kan parametere endres for å optimalisere kostnytte-effekten av regnbed? Nedbørsdata fra forskjellige regioner (Bergen (Sand-sli), Oslo (Blindern), Trondheim (Risvollan)) kan benyttes til å lage dimensjoneringsretningslinjer/design-kriterier (tommelfingerregler) for regnbed i under norske forhold generelt, og også regionalt baserte.

3. Organisering, veiledning og samarbeid

Oppgaven skal skrives som en artikkel til VANN (retningslinjer). Studentprosjektet vil bli utført ved Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. Hovedveileder er første amanuensis Sveinn. T. Thorolfsson og medveileder PhD kandidat Kim A. Paus ved Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.

4. Presentasjon og innleveringsfrist

Innleveringsfrist : 11.06.2012

Institutt for Vann- og Miljøteknikk, NTNU

Forord

Masteroppgaven (TVM 4905 Vannforsynings- og avløpsteknikk) utgjør 30 studiepoeng og er utført våren 2012 ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk ved NTNU, Trondheim. Oppgaven omhandler datainnhenting fra Risvolla regnbed, simulering ved hjelp av RECARGA og vurdering av dimensjoneringskriterier for regnbed.

En stor takk til hovedveileder og førsteamanuensis Sveinn T. Thorolfsson ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk. Thorolfsson har jevnlig fulgt opp arbeidet mitt fra Island via Skype. Spesielt takk for å motivere meg til å presentere arbeidet i form av poster på seminarer og artikler i tidsskrifter. Takk til medveileder og PhD kandidat Kim H. Paus. Paus har veiledet meg fra Oslo via Skype. Spesielt takk for hjelp i første uken av forsøksperioden i laboratoriet, slik at jeg fikk bygget kolonneriggen og kom i gang med forsøkene. Paus har i tillegg vært med å utføre MPD-forsøkene.

Forskningsrådprosjektet ExFlood har muliggjort veiledning fra forsker Bent Christen Braskerud ved NVE. Braskerud har vært kontaktperson for datainnhenting fra sensorene på Risvolla regnbed. Braskerud har stilt med videokonferanselokaler hos NVE. Dermed har masterstudentene Vegard Saksæther og Kjetil Kihlgren ved UMB, Paus, Braskerud og undertegnede hatt tre videomøter i løpet av semesteret. Møtene har vært nyttige i form av faglige diskusjoner og kommentarer til hverandres arbeid.

Takk til alle som har bidratt praktisk og økonomisk:

- Patrick Muraya og Inge Hoff ved institutt for Bygg, Anlegg og Transport (BAT) for grus til infiltrasjonsforsøk.
- Terje Skogseth ved BAT for lån av Leica GPS til innmåling av infiltrasjonspunkter.
- Forset Grus AS for løvkompost og sand til infiltrasjonsforsøk.
- Ingeniør Geir Tesaker for hjelp med å bygge kolonnerigg i verkstedet.
- Avdelingsingeniør Trine Margrethe Hårberg Ness for veiledning og tilgang til laboratoriet slik at jeg kunne gjøre glødetapstest av filtermaterialene.
- Interreg 4b prosjektet SAWA som har betalt 50% av Risvolla regnbed, samt Fremtidens byer, NVE og NTNU som har bidratt praktisk og økonomisk ved bygging av regnbedet sommeren 2010.

Til slutt takk til alle som har foreslått litteratur, sendt artikler og svart på spørsmål via epost:

Gary Oberts, professor Chris Jefferies (University of Abertay Dundee), forsker William Shuster (United States Environmental Protection Agency), Hans Bäckman (Svensk Vatten), Dr. Alejandro Dussailant (University of Greenwich), Knut Iden (Meteorologisk Institutt) og Farzana Ahmed (phd. student ved University of Minnesota).

Dato/Sted

Torstein Dalen

Sammendrag

Økt andel tette overflater i byer gir større mengder overvann som må håndteres. Regnbed er en vegetert forsenkning i terrenget hvor overvann samles og infiltreres. Et typisk regnbed er bygd opp av et filtermedium av jord og løvkompost og beplantet på overflaten. Et godt fungerende regnbed vil infiltreres tomt for vann mellom hvert nedbørstilfelle. Fordelen med regnbed er at filtermediet vil holde igjen en rekke forurensninger, overvann vil infiltrere til grunnvann og vann vil bli fordrøyd i regnbedet. Regnbed har blitt populært både i USA og Canada, mens bruken er beskjedent i Norge. Noe av årsaken er manglende dimensjoneringskriterier/metoder og usikkerhet rundt ytelsen til regnbed i kaldt klima. Hovedmålet med denne oppgaven er derfor å dokumentere den hydrologiske ytelsen til regnbed og hvilke faktorer som bør spille inn på dimensjoneringen av regnbed. Arbeidet baserer seg på feltforsøk med Modified Phillip-Dunne infiltrometere, laboratorieundersøkelser av Risvollan regnbed (Trondheim), simulering av kontinuerlig målte vannføringer i Risvollan regnbed og laboratorieundersøkelser av ulike filtermedier.

RECARGA kan modellere vanngjennomstrømmingen i et regnbed. Modellen har blitt kalibrert med infiltrasjonsevnen mot vannføringsdata høsten 2011 og våren 2012 i Risvollan regnbed. RECARGA har vist godt samsvar med målte data. Sammen med infiltrasjonsforsøk i felt har dette dokumentert stor variasjon i vannmettet hydraulisk konduktivitet i perioden juli 2011 til mai 2012 (0.4-2.8 cm/time). Infiltrasjonen var som forventet størst i sommerhalvåret.

Feltforsøkene avdekket stor variasjon i infiltrasjonsevne på overflaten (0-35 cm/t). Årsaken kan skyldes ulik grad av kompaktering, biologisk aktivitet fra planter og insekter, samt finstoff i innløpsvannet som sedimenterer på overflata. Infiltrasjonsforsøk i felt samsvarte godt med infiltrasjonsevnen funnet med RECARGA. Enkle feltforsøk kan dermed brukes til å beregne ytelsen til allerede anlagte regnbed og i tillegg avdekke områder i regnbedet som bør rehabiliteres.

Regnbeds ytelse har blitt simulert ved hjelp av RECARGA med avrenningsdata fra Bergen, Trondheim og Ås. Resultatet viser at 95 % av årsavrenningen kan infiltreres alle tre stedene med et regnbed på 2.5 % av nedbørsfeltet og infiltrasjonsevne på 10 cm/time. For regnbed som er mindre enn 2.5 % av nedbørsfeltet eller har lavere infiltrasjonsevne enn 10 cm/t vil ytelsen være forskjellig i Bergen, Trondheim og Ås.

Regnbed som skal redusere flomtoppen må være større enn et regnbed som kun skal infiltrere mest mulig av årsnedbøren. Simulering av et tre timers 15års regn i Trondheim (25.8 mm) viser at regnbed som er 7 % av nedbørsfeltet vil gi en flomtoppreduksjon på 90 %. Dermed kreves det to forskjellige dimensjoneringsmetoder avhengig av formålet. Metoden som er foreslått for å håndtere årsnedbøren baserer seg på simulerte avrenningsdata fra smeltebrett. Metoden som er foreslått for å håndtere moderate nedbørstilfeller baserer seg på IVF-kurver og amerikanske dimensjoneringsmetoder.

Arbeidet viser at hydraulisk konduktivitet er en av nøkkelfaktorene for å lykkes med regnbed. Denne avhenger av sammensetningen av filtermediet. Infiltrasjonsforsøk i

laboratoriet viser at den hydrauliske konduktiviteten synker med mengde løvkompost, noe som tilsier at lavt innhold av organisk materiale er nødvendig for regnbed i kaldt klima. Lavere andel organisk materiale kan senke renseeffekten og påvirke vekstforholdene for plantene. Kompostandelen må derfor bestemmes ut fra nødvendig mengde organisk materiale for renseeffekt, plantevekst og infiltrasjonsevne i regnbed.

Abstract

The growth of urban surfaces leads to increased stormwater volumes. Raingardens are shallow planted depressions which facilitate a local management of stormwater. A raingarden is constructed using a filter media of sand and leaf compost, and vegetated with local plants. A well-functioning raingarden will drain completely between each rainfall event. As much as pollutant removal, groundwater recharge and retention/detention of stormwater are some of the benefits, these facilities have become popular in USA and Canada. However, the application of raingardens in regions with cold climates such as Norway is modest. This is likely due to lack of design criteria and also uncertainties and skepticism concerning of raingarden performance during cold climate conditions. Hence, the overall objectives for this MSc Thesis are to document the performance of a pilot-raingarden in cold climate, and further to develop design guidelines/criteria for application in Norway. The conducted work of this research is field tests using Modified Phillip-Dunne Infiltrimeters and assisted laboratory work, model simulations of continuous measured water flows in Risvollan raingarden, and finally, laboratory column studies with different filter media compositions.

The RECARGA model was used to simulate the movement of water through the raingarden. Best-fit infiltration rates were estimated by fitting the model results to the field data collected from fall 2011 and to spring 2012. Overall, the results of RECARGA shows a good fit between simulated and observed data. Both model results and field tests indicate that the saturated hydraulic conductivity ranged from 0.4 to 2.8 cm/hr during the study period. As expected the conductivity was greatest during warmer months.

Field tests showed large variation in conductivity at the surface of the raingarden (ranged from 0 to 35 cm/hr). This may be due to compaction, biological activity and fines from the incoming water. Conductivity estimated from field tests showed a positive correlation with infiltration rate found by RECARGA. This result implies that simple field tests can be used to evaluate the performance of existing raingardens and to identify areas within raingardens that need rehabilitation.

Runoff data from Bergen, Trondheim and Ås were used as input in the RECARGA model to evaluate the hydrological performance of different raingarden designs. The results showed that a standard raingarden with a surface area equal to 2.5% of the catchment area, and a conductivity of 10cm/hr, is capable of infiltrating 95% of the annually runoff from an impervious surface . The performance of smaller raingardens (i.e., area <2.5% of catchment) with a lower infiltration rate than 10cm/hr, will depend on the location (Bergen, Trondheim and Ås).

Raingardens have to be larger in order to reduce the peakflow. A 3 hour 15 year rainfall in Trondheim (25.8mm) will need a raingarden area of 7% of the catchment to yield a 90% peak flow reduction. This results in two different approaches for raingarden sizing depending on the purpose. The method proposed for designing raingardens that will infiltrate most of the annually runoff is based on simulated runoff data. The method proposed for managing peak flow is based on IDF-curves

and American guidelines.

Overall, this MSc thesis shows that the hydraulic conductivity is a key factor for adequate raingarden performance. Generally, the hydraulic conductivity depends on characteristics of the filter media. Laboratory infiltration studies showed that the hydraulic conductivity decreased with increasing amount of leaf compost, implying that filter media with low organic content may be suited for cold climate raingardens. Nevertheless, a filter media with low compost content may decrease treatment efficiency and vegetation growth, and the use compost must therefore be balanced according to this.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	1
1.1	Regnbed	1
1.2	Oppgavestruktur	2
1.3	Mål for oppgaven	2
2	Bakgrunn	3
2.1	Utforming av regnbed	3
2.1.1	Stedlige masser	3
2.1.2	Regnbedets areal	3
2.1.3	Maksimal vannstand og dreneringstid	3
2.1.4	Planter	4
2.1.5	Rotsonen og filtermedia	5
2.1.6	Dreneringsrør	6
2.1.7	Lagersonen	6
2.1.8	Vedlikehold	6
2.1.9	Dimensjoneringsformål	7
2.1.10	Dimensjoneringsmetoder	8
2.2	Prosesser og teori	12
2.3	Utfordringer i kaldt klima	15
2.3.1	Gjenfrysing av filtermediet	16
2.3.2	Snøvolum	17
2.3.3	Andre utfordringer	18
3	Metode	19
3.1	Feltbeskrivelse av Risvollan regnbed	19
3.1.1	Geometriske forhold	22
3.2	Simulering	24
3.2.1	Beregninger i RECARGA	24
3.2.2	Kalibrering av RECARGA	27
3.2.3	Mål på hvor god kalibreringen er	27
3.3	Regionale forskjeller i regnbeds ytelse basert på nedbørs og smeltesdata	28
3.4	Estimering av regnbeds ytelse under styrtregn	30
3.5	Modified Philip-Dunne Infiltrometer	30
3.6	Infiltrasjonsforsøk i laboratoriet	32
3.6.1	Materialer	32
3.6.2	Gjennomføring av forsøk	32
3.6.3	Beregning av tensjon og vannmettet hydraulisk konduktivitet	33
3.6.4	Beregning av andre parametere	36
4	Resultater og diskusjon	38
4.1	Kontinuerlige målinger	38
4.2	Kalibrering av RECARGA	48
4.3	Regionale forskjeller i regnbeds ytelse	57
4.4	Simulering av styrtregn	59
4.5	Infiltrasjonstest i laboratoriet	61

5	Vurderinger og diskusjon	65
5.1	Sammenligning av vannmettet hydraulisk konduktivitet fra RECAR- GA mot MPD-forsøk	65
5.2	Variasjon i infiltrasjon gjennom året	66
5.3	Vurdering av dimensjoneringskriterier	68
5.4	Valg av strategi for implementering av regnbed som flomreduserende tiltak	72
6	Konklusjon	74
7	Forslag til videre arbeid	75
	Litteraturliste	76
A	Artikkel innsendt til VANN for fagfellevurdering	81
B	Artikkel innsendt til Kommunalteknikk	95
C	Sammenligning av regnbeds ytelse i Bergen, Trondheim og Ås	102

Figurer

1	Oppbygning av regnbed (Paus 2012, basert på Stenberg (2011))	2
2	Vedlikeholdspyramiden, laget etter Erickson et al. (2010)	7
3	Vannvolum for ulike formål ved dimensjonering, basert på såkalt “Rainfall Frequency Spectrum”(Caraco and Claytor, 1997)	8
4	Prosesser i et regnbed (Paus, 2011)	12
5	Gjenfrost parkområde i Trondheim, 6 mars 2012	17
6	Risvolla Regnbed uten filtermediet, V-overløp inn til venstre, V-overløp ut midt på. Infiltrert vann samles i drenerør (svarte) og renner ut i overløpskassen til høyre.	20
7	Risvolla regnbed med filtermediet og planter på toppen under et nedbørstilfelle	20
8	Manuell kontroll av vannhøyden foran V-overløp	21
9	Risvolla Regnbeds arealer	22
10	Risvolla Regnbeds nedbørsfelt	23
11	T.v. Smeltevannsbrettet på Rustadskogen (foto Bent C. Braskerud). T.h. smeltevannsbrettet på Risvolla (foto Torstein Dalen)	29
12	Modifisert Phillip-Dunne Infiltrimeter i bruk. Foto: Torstein Dalen . . .	31
13	Forsøksoppsett, kolonne med filtermediet samt plass til vann på toppen. Foto: Torstein Dalen	33
14	Resultater fra infiltrasjonsforsøk viser at MH-metoden gir ett godt estimat på tensjon og hydraulisk konduktivitet	35
15	Nedbørshendelsen 8-9 august 2011, viser regnbedets gode evne til både fordrøye og redusere spissvannføringen.	39
16	Nedbørshendelse 13-14 september 2011, viser at utfordringen for regnbed er når flomtoppen kommer etter at regnbedet er fullt.	40
17	Risvolla Regnbed ved forskjellige årstider (foto Torstein Dalen) . . .	41
18	Risvolla regnbed ved forskjellige årstider (foto Torstein Dalen) . . .	42
19	Risvolla regnbed ved forskjellige årstider (foto Torstein Dalen) . . .	43
20	Vanskeligheter med vintermålinger (foto Torstein Dalen)	45
21	Vanskeligheter med vintermålinger (foto Torstein Dalen)	46
22	Sørpe har smeltet rundt plantene. 22. mars 2012 (foto Torstein Dalen)	47
23	Vannstanden i regnbedet i September, Simulert og virkelig.	48
24	Vann i overløp i september	49
25	Vannmengder i dreneringsløpet	50
26	Vannmengder i dreneringsløp: målt og simulert	51
27	Vannmengder i overløp: målt og simulert	51
28	Maksimal vannstandstimer estimeres godt med månedsvise kalibrering.	52
29	Simulering i RECARGA med minuttsoppløsning viser greit samsvar med målt vannføring i dreneringsrør.	54
30	Simulering i RECARGA med minuttsoppløsning viser godt samsvar med målte verdier	55
31	Simulering med minuttsoppløsning 7. september 2011.	56
32	Smelte- og nedbørsdata fra Risvolla, Trondheim simulert i RECARGA viser at små regnbed gir lang dreneringstid og regnbed over 6% av impermeable flater gir liten gevinst i forhold vannmengde infiltrert.	57
33	Smelte- og nedbørsdata fra Rustadskogen, Ås simulert i RECARGA .	58

34	Smelte- og nedbørsdata fra Sandsli, Bergen simulert i RECARGA . . .	59
35	Innløps- og utløps hydrogrammer for de 30 mest intense minuttene av nedbørshendelsen 28-29 juli 2007	60
36	Siktekurver til filtermaterialene som ble testet	61
37	Infiltrasjonsevnen synker med andelen løvkompost og temperatur. Feil-barene viser standardavviket.	62
38	Vanninnhold i kolonnene med løvkompost. . Feil-barene viser standardavviket.	63
39	Vanninnhold etter 24 timer øker med økende andel organisk materiale. 63	
40	Sesongvariasjon i infiltrasjonsevne i Risvolla regnbed, basert på RECARGA kalibrering og MPD-forsøk	66
41	Variasjon i infiltrasjonsevne gjennom året(Braga et al., 2007)	67
42	Dimensjonering av regnbed for håndtering av større nedbørshendelser 70	
43	Prinsipiell forskjell mellom konvensjonell overvannshåndtering og LOH, (laget etter Aabling et al., 2011)	72
44	Prinsipp for kombinasjon av LOH og konvensjonelt rørsystem. Når fordrøyningsvolumet er fullt øker vannføringen ut av nedbørsfeltet raskt til det den avrenningen nedbørsfeltet ville hatt uten LOH-tiltak. 73	
A.1	Oppbygging av regnbed	83
A.2	Nyanlagt regnbed på Risvolla; innløp til høyre (1), overløp midt på (2) og drensutløp til venstre (3). Foto Arvid Ekle	84
A.3	Sammenligning av målte vannmengder mot simulert vannmengder i RECARGA	87
A.4	13-14. september 2011 målt og simulert	89
A.5	Vannføring til regnbed under et styrtregn i Trondheim 28-29. juli 2007. Avrenning gjennom dren og overløp avhenger av regnbedets andel av nedbørfeltet.	90
A.6	Data fra smeltebrettet på Risvolla viser at store deler av årsnedbøren kan infiltreres.	91
B.1	Risvolla regnbed (foto Arvid Ekle)	96
B.2	Skjematisk oppbygging av regnbed (K. Paus 2012)	96
B.3	Modified Phillip-Dunne infiltrometer i bruk	98
B.4	Infiltrasjonsforsøk viser stor variasjon i infiltrasjonsevne på overflaten i regnbedet.	99
C.1	Årlig infiltrasjon Bergen, Trondheim og Oslo	102

Tabeller

1	Begrepsavklaring	13
3	Områder med behov for kaldt klima tilpasning (Caraco and Claytor, 1997)	15
4	Utfordringer i kaldt klima (Caraco and Claytor, 1997)	16
5	Oversikt over instrumentering på Risvollan Regnbed	21
6	Risvollan Regnbeds geometriske forhold	22
7	Nash-Sutcliffekoeffisienter for lange dataserier	53
8	Nash-Sutcliffekoeffisienter for simulering av enkelthendelser høsten 2011	53
9	Nash-Sutcliffe koeffisienter for våren 2012	54
10	Sammenligning av vannmettet hydraulisk konduktivitet (cm/t)	64
11	Gjennomsnittlig vannmettet hydraulisk konduktivitet [cm/time] funnet ved MPD og RECARGA	65
12	Parametere i dimensjoneringsmetoder, X=parameteren inngår i metoden	68
13	Nash-Sutcliffe-koeffisienter for enkelthendelser. Koeffisienter på 1.0 betyr perfekt tilpassing	88
14	Vannmettet hydraulisk konduktivitet (cm/time) målt med MPD og simulert ved hjelp av RECARGA	99

Elektronisk vedlegg

Vedlegg 1: Data som er benyttet

- Kontinuerlige målinger av Risvollan regnbed høsten 2011 og vinteren 2011/2012.
- Smeltesdata fra Sandsli, Risvollan og Rustadskogen.
- Resultater fra infiltrasjonstest i laboratoriet.
- Jord- og lufttemperaturdata fra Voll målestasjon.

Vedlegg 2: Figurer og bilder benyttet i oppgaven.

Vedlegg 3: Video av Risvollan Regnbed

Vedlegg 4: Resultater

- RECARGA
- Laboratorieforsøk
- Resultater fra MPD-forsøk høsten 2011 og våren 2012

Vedlegg 5: Beregninger i oppgaven

- Beregning av porevolum med Ogata-Banks metode.
- Dimensjonering for spissvannføringsreduksjon

Vedlegg 6: Matlabkode for utregning av hydraulisk konduktivitet og tensjon ved hjelp av Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011) metode

Artikler som er skrevet er gitt som vedlegg i slutten av oppgaven, og er nummerert A, B og C.¹

¹Forsidebilde: Risvollan Regnbed 5. Juni 2012, Foto Torstein Dalen

1 Innledning

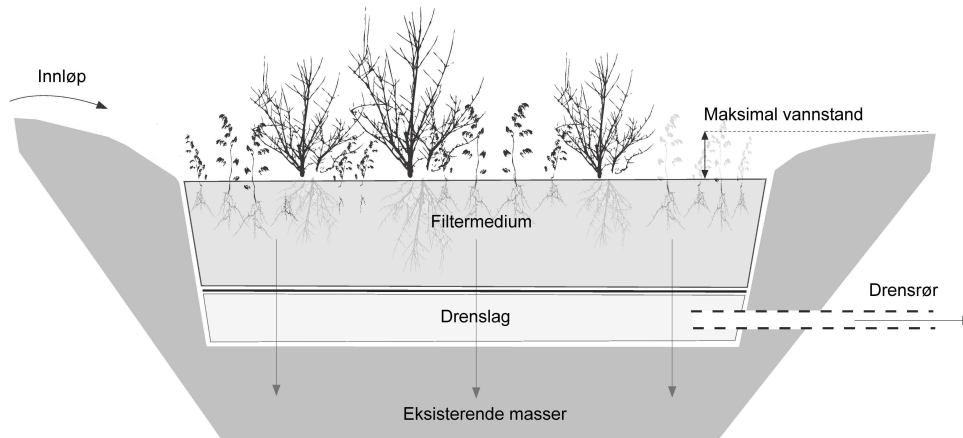
Økt andel tette overflater i byer gir større mengder overvann som må håndteres. Forventede klimaforandringer vil gi hyppigere og mer intens korttidsnedbør. Norsk Vann har utarbeidet en veileder (Lindholm et al., 2008) hvor en tre-ledds strategi for å møte utfordringene presenteres: (1) Infiltrere avrenning fra mindre nedbørstilfeller, (2) forsinke og fordrøye avrenning fra moderate nedbørstilfeller og (3) sikre åpne flomveier for avrenning fra større nedbørstilfeller. Et regnbed er et tiltak som skal håndtere overvannet gjennom ledd (1) og (2).

Begrepet regnbed oppstod på 1990-tallet i Maryland, USA. Siden den gang har bruken av regnbed økt og blitt svært populært i USA og Canada. Blant annet ønsker Kansas City i USA å bygge 10 000 regnbed (SCI, 2005). New York vil bruke ca 187 millioner dollar de neste tre årene og ca. 2.4 milliarder dollar de neste 18 årene på grønn infrastruktur for å bedre overvannkvaliteten og senke overløpsmengden fra fellessystemer (DEC, 2012). Noe av årsaken til at regnbed er lite brukt i Norge er usikkerhet rundt den hydrologiske ytelsen til regnbed i kaldt klima og ikke minst at det mangler dimensjoneringskriterier for regnbed i Norge.

Risvolla regnbed er Norges største forskningsregnbed (27.0m² bunnareal). I denne oppgaven er data fra Risvolla regnbed blitt brukt til å modellere nedbørshendelser høsten 2011 og våren 2012 ved hjelp av RECARGA. I tillegg er felt og laboratorieundersøkelser utført. Risvolla regnbed er designet av UMB student Erle Stenberg, planlagt av NVE forsker Bent Braskerud og anlagt høsten 2010 av anleggsgartner Arvid Ekle. Regnbedet er støttet økonomisk og praktisk av Interreg 4b-prosjektet SAWA (www.sawa-project.eu), Framtidens byer (www.framtidensbyer.no), Trondheim kommune (www.trondheim.kommune.no), NVE (www.nve.no) og NTNU (www.ntnu.no).

1.1 Regnbed

Regnbed er bygd opp som en forsenkning, med et filtermedium bestående av sand og organisk materiale (typisk løvkompost), og beplantet med vegetasjon på overflaten (figur 1). Overvann vil oppsamles og lagres på overflaten opptil en viss vannstand. Når denne grensen overstiges vil ytterligere overvann renne i overløp. Selv om filtermediets hovedoppgave er å gi gode vekstvilkår for vegetasjon, vil riktig sammensetning av filtermediet også binde til seg mye av forurensningene i overvannet. Regnbedets forsenkning bidrar til å fordele vannet på overflaten, samt at det fungerer som et fordrøyningsvolum. Plantene bidrar til et godt estetisk uttrykk samt opprettholder permeabiliteten i jorden. Hvis de omkringliggende massene har lav infiltrasjonsevne kan dette løses ved legge et drenerør på bunn av filtermediet som vist på figur 1. Det vil gjøre at mer vann filtrerer, men også at mindre vann går til grunnvann. Fra et vannkvalitetsperspektiv er det ønskelig at mest mulig vann blir infiltrert, fordi mesteparten av forurensningene filtreres bort i de øverste centimeterne av jorden (Li and Davis, 2008b,a). Vann som går i overløp blir ikke infiltrert. Ved å legge inn et sjikt bestående av pukke med høy porøsitet under filtermediet kan ytterligere vann infiltreres ned til grunnvann.



Figur 1: Oppbygning av regnbed (Paus 2012, basert på Stenberg (2011))

1.2 Oppgavestruktur

Først vil utforming av regnbed samt anbefalinger fra litteraturen gjennomgås. Utfordringer i kaldt klima vil presenteres. Deretter vil metodene for felt- og laboratorieundersøkelser samt simulering i RECARGA gjennomgås. Resultatene fra felt- og laboratorieforsøk presenteres sammen med noe diskusjon og forklaring av resultatene. Før konklusjonen kommer et diskusjonskapittel om dimensjonering, implementering og utfordringer ved regnbed.

1.3 Mål for oppgaven

Hovedmålet for oppgaven er å finne metoder og/eller kriterier for dimensjonering av regnbed i Norge.

1. Kalibrere RECARGA mot målte data fra Risvollan regnbed ved å variere infiltrasjonsevnen i modellen. Infiltrasjonsforsøk i felt og i laboratoriet vil verifisere om RECARGA gir et godt estimat på infiltrasjonsevnen. Videre vurdere om RECARGA estimerer utløpshydrografen på en god måte.
2. Bruke RECARGA til å undersøke ulike parameters innvirkning på regnbedets ytelse (areal, infiltrasjonsevne, regional plassering).
3. Evaluere eksisterende dimensjoneringsmetoder for regnbed basert på informasjon fra simulering, felt- og laboratorieforsøk.

2 Bakgrunn

Erfaringer og dimensjoneringsveiledninger for regnbed (*eng. raingarden/bioretenction*) kommer hovedsaklig fra USA, hvor regnbed første gang ble bygget med det formål å bedre overvannshåndteringen. Dette kapitlet vil ta for seg hvordan regnbed utformes, hva som er anbefalte dimensjoner for regnbed og noen av utfordringene med regnbed. I tillegg vil de begreper, prosesser og teori som er nødvendig for å forstå funksjonen til regnbed gjennomgås.

2.1 Utforming av regnbed

Dette kapitlet tar for seg anbefalt utforming og dimensjoner for regnbed.

2.1.1 Stedlige masser

Omkringliggende masser, såkalt ”in situ masser” eller stedlige masser, er de massene som er på stedet regnbedet skal anlegges.

”Den vannmettede hydrauliske konduktiviteten til det begrensende laget i et regnbed er den viktigste faktoren for design og ytelse” (Atchison et al., 2006).

Det er derfor viktig å undersøke de omkringliggende massene i områder hvor regnbed skal bygges. Både for å finne de best egnede plassene for regnbed, og for å dimensjonere og utforme regnbed på en god måte. Bestemmelse av den vannmettede hydrauliske konduktiviteten kan for eksempel gjøres ved feltforsøk (infiltrometer tester) eller ut fra klassifisering av jordart og oppslagsverk. Minnesota Stormwater Manual (TMSM, 2008) anbefaler 2.5 cm/time som minste vannmettede hydraulisk konduktivitet i de omkringliggende massene før drenerør bør installeres i regnbedet.

2.1.2 Regnbedets areal

Regnbedets areal bestemmer hvor stort areal som er tilgjengelig for infiltrasjon samt hvor stort volum som er tilgjengelig for fordrøyning, og er dermed en av de viktigste design parametrene som må bestemmes. En liten økning i regnbedareal kan gi en stor økning i årlig overvann infiltrert opp til et visst nivå, hvor en videre økning i regnbedareal kun gir en minimal økning i årlig overvann infiltrert (Atchison et al., 2006).

2.1.3 Maksimal vannstand og dreneringstid

Maksimal vannstand er høyden fra vannspeilet til jordoverflaten i regnbedet. Vannstand i regnbed gir et fordrøyingsvolum samtidig som det sprer vannet utover infiltrasjonsoverflaten og sørger for at partikler kan sedimentere i regnbedet. Regnbedet designes for å kunne dreneres tomt for vann (både overflate og vann lagret i filteret) innen en viss tid (dreneringstid), som oftest 2-3døgn. Prince George’s County Bioretention Manual (TPGC, 2007) anbefaler 2 dager dreneringstid, Hinman (2005) anbefaler 1 døgn og Minnesota Stormwater Manual (TMSM, 2008) anbefaler 2-3 døgn. Det er spesielt tre grunner til at dreneringstiden er viktig i forbindelse med

regnbed: (1) Plantene tåler bare å stå en viss tid i vann før de drukner, (2) regnbedet er avhengig av å bli tømt før neste nedbørshendelse kommer for å unngå at vann renner i overløpet (Urbonas et al., 2011) og (3) stående vann over lengre tid kan føre til myggproblemer. Planter som dør er en tidlig indikasjon på for lang dreneringstid i regnbedet (Atchison et al., 2006). Atchison et al. (2006) anbefaler en maksimal vannstand på 10-46 cm og Hinman (2005) anbefaler maksimalt 30cm maksimal vannstand. Davis et al. (2009)) anbefaler å velge maksimal vannstand avhengig av

1. Formen på innløpshydrografen.
2. Årlig vannvolum som ønskes infiltrert.
3. Totalt volum som bør kunne magasineres på overflaten.
4. Infiltrasjonsevnen til filtermediet.
5. Porøsiteten i filtermediet.
6. Infiltrasjonsraten i omkringliggende masser.
7. Antatt vedlikeholdsbehov.

Man bør være oppmerksom på forskjellen mellom dreneringstid og vannstandstimer. Dreneringstiden er tiden det tar å drenere regnbedet tomt for vann fra maksimal vannstand til mettet strømming opphører filtermediet. Dette er en designparameter som er avhengig av maksimal vannstand, dybde på filtermediet og infiltrasjonsevnen.

Vannstandstimer er antall sammenhengende timer med vannstand i regnbedet. Vannstandstimer vil dermed alltid være et større antall timer enn dreneringstiden, fordi antall timer det tar å fylle opp regnbedet, varigheten på nedbøren og tiden mellom nedbørshendelser vil påvirke antall timer med vannstand i regnbedet. Det resulterer i at to regnbed med samme dreneringstid kan i løpet av et år ha forskjellig maksimalt antall vannstandstimer avhengig av hvor i landet regnbedet er og nedbørsfeltets størrelse. Maksimalt antall vannstandstimer er da den perioden plantene faktisk må tåle å stå under vann, og er derfor en viktig parameter når det gjelder valg av planter i regnbedet.

2.1.4 Planter

Planter og insekter øker permeabiliteten ved å lage vertikale tuneller i jorden. Dette blir noen ganger referert til som biologiske permeabilitet (Davidson et al., 2008). Ved siden av å opprettholde permeabiliteten i jorden, sørger plantene for at regnbedet har et godt estetisk uttrykk. I tillegg vil planter være med på å fjerne en del forurensninger (TMSM, 2008; TPGC, 2007; Atchison et al., 2006), ta opp næringsstoffer og fordampe vann. Derfor er det viktig å dimensjonere filtermediets sammensetning, maksimal vannstand og dreneringstid slik at plantene får gode vekstvilkår. Plantesorter som velges bør kunne stå under vann samtidig som de må tåle lengre tørkeperioder. Generelt anbefales bruk av stedeagne planter. I kaldt klima anbefales planter med dype røtter (Davidson et al., 2008).

2.1.5 Rotsonen og filtermedia

Rotsonen defineres som den delen (ca 20-30cm) som er i direkte kontakt med røtter. Rotsonens oppgave er å være et vekstmedium for plantene. Det vil si sørge for nok næring og vann. Rotsonen består derfor av sand, kompost og et topplag bestående av grovere organisk materiale (barklag, *eng. mulch*). Begrepene rotsone og filtermedia brukes ofte om hverandre, fordi de i utgangspunktet er samme jordmaterialet. Prince George's County (TPGC, 2007) anbefaler 50 % sand, 30 % matjord (*eng. topsoil*) og 20 % organiske materialer (f. eks kompost). Staten Delaware anbefaler et filtermedium bestående av 1/3 sand, 1/3 torvmose og 1/3 kvernet bark (Davis et al., 2009). Hunt and Lord (2006) anbefaler en blanding av 85-88 % sand, 8-12 % finstoff (leir og silt) og 3-5 % organisk materiale for Nord-Carolina, USA. Minnesota (TMSM, 2008) anbefaler 55-65 % sand, 10-20 % matjord (<5 %leir) og 25-35 % løvkompost. Davidson et al. (2008) gjorde en studie av fire regnbed i Minnesota, og kom fram til at kombinasjonen av høyt vanninnhold, fin tekstur og lave temperaturer gav lav infiltrasjonsraten, og anbefaler derfor jordmasser som lett drenerer ut vann. Atchison et al. (2006) anbefaler 60 cm dybde, mens Minnesota (TMSM, 2008) anbefaler 0.76m (2.5feet). Hinman (2005) anbefaler minimum 0.3m til 0.9m (1-3feet) dybde fra bunn filtermediet til grunnvannstanden avhengig av andel impermeable flater i nedbørsfeltet.

Davidson et al. (2008) viser hvor langt fullskala forskning med regnbed i kaldt klima er kommet. Fra 2005 til 2008 observerte Davidson et al. (2008) fire regnbed i Minnesota (kaldt klima). Resultatene viser at kaldt klima krever et mer drenerende filtermedie enn varmt klima. Det anbefales en dreneringstid på maksimalt 12 timer, maksimalt 0.3m vanddyp og Minnesota Soil Medium Mix B (50-70% sand og 30-50 % løvkompost) i kaldt klima. Minnesota Stormwater Manual (TMSM, 2008) anbefaler to forskjellige filtermedier avhengig av ønske om høy rensegrad eller høy infiltrasjonsevne.

Forurensinger i overvannet vil primært bli fjernet i rotsonen. Rotsonen fungerer som filter som holder igjen større partikler og en del forurensninger adsorberes på overflaten gjennom ionebytte (Claytor and Schueler, 1996). Endringer i sammensetningen av rotsonen grunnet biologisk vekst og finstoff i innløpsvannet vil påvirke den vannmettede hydrauliske konduktiviteten. Å øke dybden på filtermediet vil gi et større volum for vannlagring i regnbedet. På grunn av gjenværende vann fra forrige nedbør samt en begrenset porøsitet, vil en økning av filtermediet ikke gi like stor økning i vannlagringskapasitet som en tilsvarende økning av maksimal vannstand. Davis et al. (2009) oppsummer kort hva som bør vurderes i forbindelse med valg av filtermateriale:

1. Evnen til å være et vekstmedium for vegetasjonen.
2. Evnen til å drenere overflatevannet innen 24 timer.
3. Evnen til å senke hydrauliske belastninger og fjerne forurensninger.
4. Livssyklus og bærekraftigheten til filtermateriale.
5. Kostnader

2.1.6 Dreneringsrør

For å redusere dreneringstiden kan man installere et dreneringsrør i filtermediet eller lagersonen. Dreneringsrøret kan installeres med en ”kran” slik at man kan regulere videreført vannmengde via dreneringsrøret. Ved å installere et dreneringsrør reduserer man mengden vann som går til grunnvann og øker mengden vann som renner ut av nedbørsfeltet. Fra et renseperspektiv vil et dreneringsrør tillate at mer vann filtrerer gjennom rotsonen i stedet for å gå i overløp, og i så måte renses. I kaldt klima anbefales det å bruke dreneringsrør slik at vann dreneres ut og filtermediet ikke fryses igjen (Davidson et al., 2008). Davis et al. (2009) mener følgende spørsmål er uavklart i forbindelse med dreneringsrør:

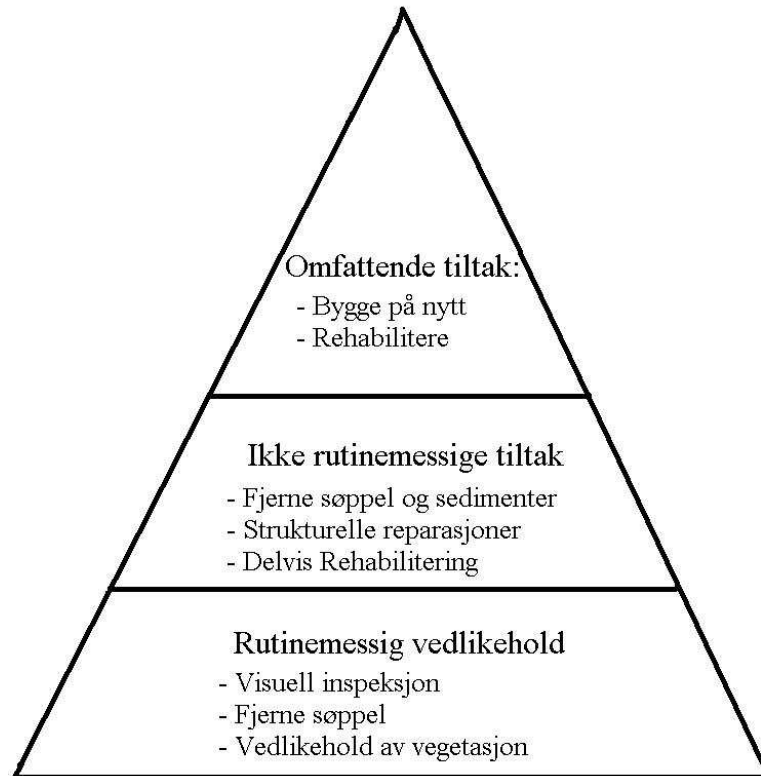
1. Når bør dreneringsrør brukes?
2. Hva er minimums infiltrasjonskapasitet som bestemmer når dreneringsrør bør installeres?
3. Bør dreneringsrørene omslutes av en geotekstil?
4. Hvis en lagerson skal etableres under dreneringsrøret, hvor dypt bør denne gå?

2.1.7 Lagersonen

Ved å bygge en lagerson av grov pukk under filtermediet øker vannmengden som holdes tilbake i nedbørsfeltet. Atchison et al. (2006) beskriver tre ting som reduserer effekten av lagersonen. (1) Porevolumet i lagersonen begrenser hvor mye vann som lagres der. (2) Hvis vannmengden inn er større enn infiltrasjonsraten til rotsonen vil vann gå i overløp før det når lagersonen. (3) I omkringliggende masser med lav hydraulisk konduktivitet kan dreneringstiden til lagersonen bli så lang at den ikke rekker å tømmes mellom nedbørshendelsene. Hvis de omkringliggende massene er lagdelt med jordarter med lav permeabilitet, vil en lagerson som går igjennom jordarter med lav permeabilitet og ned til jordarter med høy permeabilitet kunne øke infiltrasjonsevnen i regnbedet. Atchison et al. (2006) anbefaler maksimal lagerdybde på ca 1.2m og en dreneringstid for lagersonen på mindre enn fem dager.

2.1.8 Vedlikehold

Hunt and Lord (2006) fant at mye av vedlikeholdet ved regnbed skyldes ønsket om et godt estetisk uttrykk, slik som å fjerne søppel, beskjæring, tilsette matjord og gressklipping. Vedlikehold som må gjøres for å opprettholde den hydrologiske ytelsen er fjerne ting som tetter innløp og utløp, samt fjerning av sedimenter. Fjerning av sedimenter er viktig pga. av to ting: (1) Finstoffer kan tette overflaten (Dingman, 2002) og senke den hydrauliske ytelsen. (2) Tungmetaller blir i hovedsak holdt igjen i de øverste 5-10 cm av regnbedet (Li and Davis, 2008a,b). Vedlikeholdsbehovet avhenger av nedbørsfeltet og om det er forbehandling av overvannet før regnbedet (Davis et al., 2009). Erickson et al. (2010) utførte en studie av vedlikeholdet ved lokale overvannsløsninger i 36 amerikanske byer og 2 amerikanske stater, og grupperte vedlikeholdet inn i følgende grupper (figur 2)



Figur 2: Vedlikeholdspyramiden, laget etter Erickson et al. (2010)

Erickson et al. (2010) fikk inn data fra 34 regnbed. Av disse 34 regnbedene ble 64 % inspisert en eller færre ganger i året og 75 % av regnbedene trengte 16 eller færre timer vedlikehold i året. Sedimenter i regnbedet og spredning av vegetasjon fra omgivelsene til regnbedet var årsakene som oftest senket den hydrauliske ytelsen til regnbedene. Kostnadene ved vedlikehold av regnbed (og lokale overvannsløsninger generelt) er en bekymring for utbyggere. Det finnes lite eller ingen studier av dette i Norge. Erickson et al. (2010) rapporterte fra USA at fjerning av sedimenter er den delen av vedlikeholdet av lokale overvannsløsninger som koster mest penger årlig. Som tommelfingerregel foreslår Erickson et al. (2010) at vedlikeholdskostnadene over 12 år vil tilsvare utbyggingskostnadene. Weiss et al. (2007) rapporterer at den årlige vedlikeholdskostnaden for regnbed varierer fra 0.7 % til 10.9 % av anleggskostnadene.

2.1.9 Dimensjoneringsformål

Regnbed utfører flere prosesser. Disse kan optimaliseres til å oppfylle ett eller flere formål. Dermed vil dimensjoneringen avhenge av formålet. Kort oppsummert kan følgende formål listes opp:

1. Opprettholde grunnvannstand
2. Redusere årlig avrenning
3. Redusere spissvannføring
4. Rense mest mulig av overvann
5. Rense first flush delen av nedbørshendelsen.

2.1.10 Dimensjoneringsmetoder

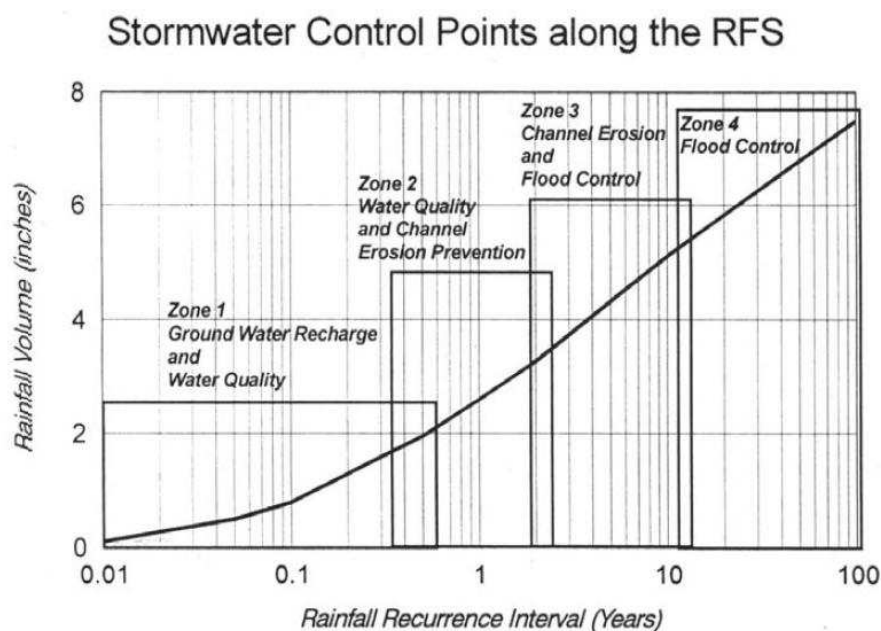
Dimensjoneringsmetoder for regnbed kommer stort sett fra USA. De fleste dimensjoneringsmetodene tar utgangspunkt i varmt klima. Foreløpige studier har vist at regnbed som fungerer godt i varmt klima også fungerer godt i kaldt klima (Davidson et al., 2008). Her vil forskjellige dimensjoneringsmetoder bli gjennomgått.

Prince George County metoden

Prince George Countys (TPGC, 2007) metode avhenger av hvilket formål regnbedet har. Først velges et av følgende fire formål:

1. Opprettholde grunnvannstanden og rense overvannet
2. Erosjonsbeskyttelse
3. Flombeskyttelse
4. Ekstrem flombeskyttelse

For hver av de fire formålene er det en beregningsmetodikk for å finne et vannvolum. Vannvolumet inngår i amerikanske dimensjoneringsretningslinjer for en rekke løsninger for lokal overvannshåndtering. Figur 3 viser hva de forskjellige dimensjoneringsmålene innebærer.



Figur 3: Vannvolum for ulike formål ved dimensjonering, basert på såkalt "Rainfall Frequency Spectrum"(Caraco and Claytor, 1997)

Deretter brukes en ligning basert på Darcys lov hentet fra Caraco and Claytor (1997):

$$A_{\text{regnbed}} = \frac{VV \cdot df}{k \cdot tf \cdot (hf + df)} \quad (1)$$

Hvor $A_{regnbed}$ er regnbedets areal (m^2), VV er vannvolumet (m^3) beregnet fra punkt 1-4, k er permeabilitetskoeffisient (m/dag) til omkringliggende masser, t_f er ønsket dreneringstid (dager), h_f er maksimal vannhøyde i regnbedet (m) og d_f er filtermediets dybde (m). Eksempelvis vil vannvolumet (VV) for å rense 0.0254m (1 inch) tilsvare

$$VV = P \cdot R_v \cdot A \quad (2)$$

Hvor P er nedbøren (0.0254m, 1 inch), og A (m^2) er nedbørfeltets areal. R_v beregnes fra andel impermeable flater ($R_v = 0.05 + 0.9 \cdot I$) hvor I er andel impermeable flater.

New York metoden

New York State Stormwater manual (NYS, 2010) bruker tilsvarende metode som Prince George County metoden for å finne volumet som må håndteres. Deretter dimensjoneres regnbedet slik at følgende er oppfylt

$$VV \leq V_{fs} \cdot \eta_{fs} + V_{ls} \cdot \eta_{ls} + d \cdot A_{regnbed} \quad (3)$$

Hvor VV (m^3) er vannvolumet som skal håndteres, V_{fs} (m^3) er volumet til filtersonen, η_{fs} er porøsiteten til filtersonen, V_{ls} (m^3) er volumet til lagersonen, η_{ls} er porøsiteten til lagersonen, d (m) er maksimal vannstand i regnbedet og $A_{regnbed}$ (m^2) er areaet til regnbedet.

New York metoden i kaldt klima

Metoden anbefales brukt hvis årlig snømengde er lik eller større enn årlig nedbør (NYS, 2010). Den baserer seg på fire forenklinger. (1) Målet er å håndtere vårmeltingen for rensformål (ikke spissvannføring). (2) Avrenningen avhenger av vanninnholdet i snøen og vanninnholdet i jorden. (3) Maksimalt 5% av den årlige avrenningen skal gå i overløp i smelteperioden. (4) Konstruksjonen kan håndtere større avrenningsvolum enn det den selv har. (jmf. ligning 3, hvor regnbedet har et volum tilsvarende avrenningen).

Hvis det finnes tilgjengelige data for regn på snø rangeres nedbørstilfellene fra minst til størst, 90 % persentilen velges som dimensjonerende nedbørshendelse, og deretter brukes ligning 2 til å finne nødvendig volum.

Hvis slik data ikke er tilgjengelig beregnes vannmengde i snøen slik

$$M = 0.1 \cdot S - L_1 - L_2 - L_3 \quad (4)$$

Hvor M (m) er vannmengde i snøen, S (m) er årlig snømengde, L_1 (m) er snø som transporteres vekk, L_2 (m) er snø som sublimerer (neglisjeres) og L_3 (m) er snø som smelter vekk før vårmeltingen. Formelen antar at snødybden tilsvarer 10% i vannmengde. L_3 hentes fra tabell, og avhenger av snømengden ($M = 0.1 \cdot S - L_1$). Deretter beregnes

$$R_s = (1 - I)(M - Inf) + I \cdot M \quad (5)$$

Hvor R_s (m) er avrenningen fra snø, I er andel impermeable flater, M (m) er vannmengde i snøen (ligning 4) og Inf (m) hentes fra graf (avhengig av M og jordfuktighet tørr, moderat eller våt). Deretter beregnes avrenning fra nedbør slik

$$R = 0.9(0.05 + 0.9 \cdot I)P \quad (6)$$

Hvor R (m) er avrenningen, P er årsnedbøren og I er andel impermeable flater. Formelen multipliseres med 0.9 fordi det antas at 10% av nedbørshendelsene ikke gir avrenning. Til slutt beregnes nødvendig volum for regnbedet slik

$$VV = \frac{(R_s - 0.05 \cdot R) \cdot A}{2} \quad (7)$$

Hvor VV (m³) er vannvolumet som må håndteres (ligning 3) og A (m²) er nedbørfeltets areal. Ligningen divideres på 2 fordi snøsmelting gir en saktere avrenning enn nedbør (NYS, 2010).

Soil Conservation Service metoden

Soil Conservation Service (Hunt and White, 2001) metoden tar utgangspunkt i en nedbørsmengde (1.27cm) som skal håndteres uavhengig av type filtermedie. Beregningsmetodikken er som følger

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (8)$$

$$D = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (9)$$

$$A_{regnbed} = \frac{D \cdot A}{hf} \quad (10)$$

Her er CN kurvetallet (avhengig av jordtype i nedbørsfeltet, 98 for tette flater), P (m) nedbør som skal håndteres, A (m²) nedbørsfeltets areal og hf (m) er maksimal vanndybde i regnbedet. Ser man nærmere på prinsippet i SCS metoden ser man at det er tilsvarende NYS-metoden. Først beregner man en vannmengde (D multiplisert med A) og deretter må tilsvarende vannmengde kunne lagres på overflaten i regnbedet. Siden SCS-metoden kun tar hensyn til vannlagring på overflaten i regnbedet, er den mer konservativ enn NYS-metoden som også tar med vannlagring i filtermediet.

Andre metoder

Wisconsin homeowner metoden

Wisconsin homeowner metoden (WDNR, 2003) er en måte å dimensjonere regnbed til private tomter på, typisk håndtere overvann fra hustak og gårds plass. Beregningen er som følger:

$$A_{regnbed} = A_{nedbørsfelt} \cdot S_f \quad (11)$$

Her er A (m²) areal og S_f er en faktor avhengig av omkringliggende masser, tilrenningsavstand og filtermedia dybde. Faktoren hentes fra tabellverdier.

Rasjonale metode

Den rasjonale metode (gjengitt av Muthanna, 2007) tar hensyn til overflate type i nedbørsfelt og andel areal som ønskes håndtert av regnbedet.

$$A_{regnbed} = C \cdot A \cdot T \quad (12)$$

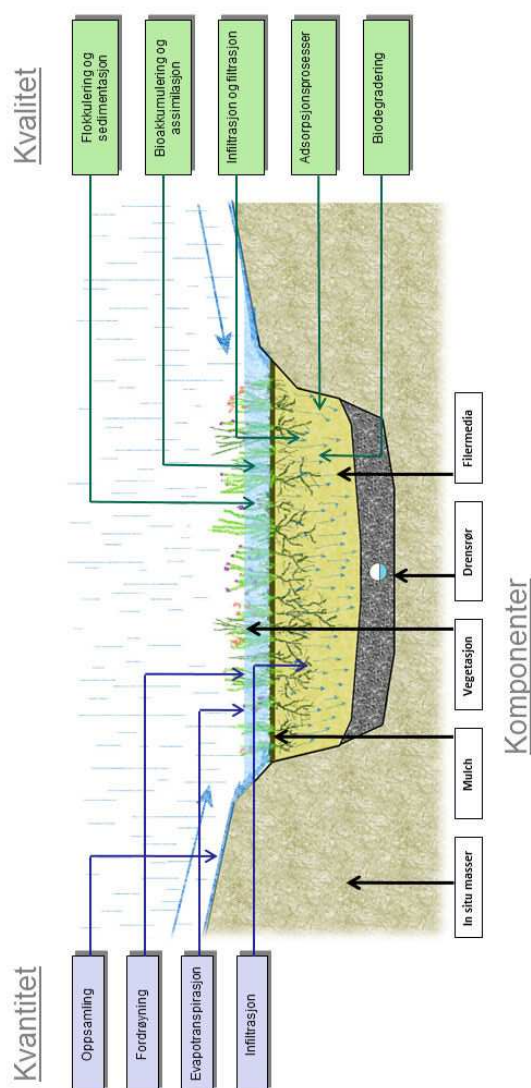
Hvor $A_{regnbed}(\text{m}^2)$ er arealet til regnbedet, C (-) er avrenningskoeffisient og T (eng. treatment factor).

Spildevandskomite metoden

Ingeniørforeningen i Danmark har utarbeidet et brukervennlig excel-ark for dimensjonering av regnbed (Aabling et al., 2011). Beregningen tar utgangspunkt i infiltrasjonsevnen og nødvendig fordrøyningsvolum (basert på gjentaksintervall og nedbørsfeltets areal) for å beregne nødvendig regnbedareal.

2.2 Prosesser og teori

Figur 4 gir en oversikt over de prosesser som skjer i et regnbed. Disse kan hovedsakelig deles opp i to grupper: Prosesser som forbedrer kvaliteten på overvannet, og prosesser som påvirker mengden videreført vann. Urbant overvann inneholder ofte partikler, tungmetaller og aromatisk hydrokarboner. For å oppnå tilstrekkelig renseseffekt i et regnbed, er det viktig at de hydrologiske og hydrauliske prosessene i regnbedet fungerer tilfredsstillende. Overvann må ha en viss oppholdstid for at partikler skal sedimentere, og jorden må ha en viss infiltrasjonsrate for at overvannet ikke skal gå i overløpet. I denne oppgaven behandles kun prosesser som har med vannmengder å gjøre, altså venstre (blå del) side av figur 4. Risvollan regnbeds evne til å fjerne partikler og PCB er evaluert i masteroppaven til Braenden (2011).



Figur 4: Prosesser i et regnbed (Paus, 2011)

En rekke begreper må plass før man behandler hydrologiske prosesser i regnbed. Tabell 1 oppsummerer disse.

Tabell 1: Begrepsavklaring

Parameter	Forklaring	Hvordan finne parameteren.
Evapo-transpirasjon	Summen av fordampning og plantenes transpirasjon. ^a	Kan beregnes med Penmans ligning, Penmans-Monteith eller en enkel sammenheng mellom potensiell fordampning, jordfuktighet og feltkapasitet, m.fl.
Feltkapasitet	Det vanninnholdet jorden har når videre infiltrasjons skjer med neglisjerbar hastighet ^a .	Flere formler tilgjengelig. Bestemmende parametere er enten aktuell tensjon ved feltkapasiteten eller infiltrasjonsrate. ^{ab}
Hydraulisk konduktivitet	Vannmettet hydraulisk konduktivitet kan defineres som det volum væske per tidsenhet som vil bevege seg gjennom en enhet areal porøst materiale, gitt kinematisk viskositet og en gradient lik 1 ^c . Måles i cm/time.	Kan estimeres blant annet med Modified Phillip-Dunne Infiltrrometer, ringinfiltrromter og i laboratoriet (se kap. om laboratorieforsøk).
Tensjon	Tensjon (også kalt matrikspotensial eller kapillært sug) synker (blir mer negativt) med synkende vanninnholdet og synkende porestørrelse ^a . Tensjonen fører til at ikke alt vannet kan dreneres ut av porene i jordmediet. Måles i cm.	Kan estimeres blant annet med Modified Phillip-Dunne Infiltrrometer i laboratoriet (se laboratorieforsøk).
Permeabilitet	Permeabilitet er et mål på jordens infiltrasjonsevne, uavhengig av temperatur og viskositet. Permeabiliteten avhenger altså kun av porenes geometri ^d .	Kan estimeres ut fra hydraulisk konduktivitet ⁱ .
Porøsitet	Porøsitet er andelen hulrom i filtermediet.	Ved hjelp av spesikk densitet til jordmaterialet, vekten av vannmettet jordprøve og tørket jordprøve, kan man beregne porøsiteten. Porøsiteten kan også finnes i tabellverdier for forskjellige jordarter ^a .
Volumetrisk vanninnhold	Vanninnholdet angis som volumet av vann dividert på volumet av jordprøven.	Vanninnholdet finner man ved å veie en jordprøve, tørke den og veie den på nytt. Deretter deler man vannvolumet på volumet av jordprøven. Et vanninnhold lik porevolumet tilsier da vannmetning.

Tabell 1 forsetter

Parameter	Forklaring	Hvordan finne paramteren.
Kornfordeling	Kornfordelingen angir masse (g) av hver kornstørrelse. Ut fra kornfordelingen kan man klassifisere jordarter, f. eks siltig sand, sandig grus, osv.	Kornfordelingen finner man ved å gjøre en sikteanalyse ^e .
Dreneringstid i regnbed	Tiden fra maksimal vannstand i regnbedet til filtermediet er drenert tomt. Anbefalt tid er 2-3 døgn ^{fg} .	Dreneringstiden finner man ved hjelp av trykksensor som logger vannstanden, eller ved hjelp av stoppeklokke.
Vannstands-timer i regnbed	Antall timer med sammenhengende vannstand i regnbedet	Vannstandstimer finner man ved hjelp av trykksensor som logger vannstanden, eller ved hjelp av stoppeklokke
Spissvannførings-reduksjon	Angir hvor mye flomtoppen har blitt redusert. Det vil si maksimal vannføring ut av regnbedet dividert på maksimal vannføring inn i regnbedet	Måle, f.eks. med V-overløp.
Forsinkelsestiden	Forsinkelsestiden kan angis på flere måter ^{ah} . Her brukes tiden (minutter) fra spissvannføring inn i regnbedet til spissvannføringen ut av regnbedet.	Måle, f.eks. med V-overløp.

^a(Dingman, 2002)^b(Nachabe, 1998)^c(Lohman et al., 1972)^d(Richards, 1952, sitert av USDA 2004)^e(SVV, 2005)^f(TMSM, 2008)^g(TPGC, 2007)^h(Hall, 1984)ⁱ(USDA, 2004)

Vannmettet hydraulisk konduktivitet er forventet å synke når temperaturen synker. Richards (1952, sitert av USDA 2004) gir sammenhengen mellom permeabilitet, hydraulisk konduktivitet og viskositet (funksjon av temperatur):

$$k = K \cdot \frac{\mu}{\rho g} \quad (13)$$

Her er k (m^2) permeabiliteten, K ($m/time$) vannmettet hydraulisk konduktivitet, μ ($kg/(meter \cdot time)$) viskositeten, ρ (kg/m^3) densiteten til vann og g (m/s^2) er gravitasjonskonstanten. Ved å bruke tabellverdier for vannmettet hydraulisk konduktivitet ved 20°C kan man regne seg frem til permeabiliteten (som er konstant), og deretter beregne vannmettet hydraulisk konduktivitet ved forskjellige temperaturer.

2.3 utfordringer i kaldt klima

Det er flere måter å definere kaldt klima på. En definisjon er områder hvor middeltemperaturen for minst en måned er mindre 1°C (Smith, 1996). Noe som innebærer at over en milliard mennesker bor i kaldt klima. En annen definisjon er områder med tre måneder med gjennomsnittstemperatur over 10°C og den kaldeste måneden har gjennomsnittstemperatur under -3°C (McKnight and Hess, 2005, sitert av Muthanna 2007). I denne sammenheng er det viktig å vite hvilket klima som gjør at regnbed må dimensjoneres annerledes enn for varmt klima. Caraco and Claytor (1997) identifiserte derfor områder hvor kaldt klima tilpasning er nødvendig basert på temperatur, lengde av vekstsesongen, frostdybde og årlig snødybde. Tabell 3 oppsummerer hvordan Caraco and Claytor (1997) identifiserte områder med behov for kaldt klima tilpasning. Desto flere parametere som havner i kaldt klima design kategorien desto større er behovet for kaldt klima tilpasning.

Tabell 3: Områder med behov for kaldt klima tilpasning (Caraco and Claytor, 1997)

Parameter	Kaldt klima design	Moderat klima
Temperatur	Gjennomsnittlig maksimal dagtemperatur i januar under 1.7°C eller under -3.9°C	Gjennomsnittlig maksimal dagtemperatur i januar over 1.7°C .
Lengde av vekstsesong	Vekstsesong på under 150 dager eller under 120 dager.	Lengre enn fem måneder.
Frostdybde	Rør må legges under frostfri dybde	-
Snømengde	Årlig snømengde over 0.9m (3 fot) eller over 1.5m (5 fot)	Mindre enn 0.9m (3 fot) årlig snømengde.
Årsnedbør	-	Årsnedbør mellom 762mm (30 inches) og 1143mm (45 inches)

Caraco and Claytor (1997) identifiserte en rekke utfordringer ved konstruksjon av såkalte Best Management Practice (BMP) ved å spørre statlige myndigheter, lokale myndigheter og private konsultantselskaper i USA. BMP innebærer tiltak som swales, regnbed, dammer, grønne tak, etc. Utfordringene er oppsummert i tabell 4:

Tabell 4: Utfordringer i kaldt klima (Caraco and Claytor, 1997)

Klimatisk tilstand	BMP design utfordring
Lave temperaturer	Gjenfrysing av rør
	Permanent fryst basseng
	Redusert biologisk aktivitet
	Redusert oksygen tilgang pga. isdekket overflate
	Redusert sedimenteringshastighet
Teledybde	Telehiv
	Redusert infiltrasjonsevne
	Gjenfrysing av rør
Kort vekstsesong	Kort tid for å etablere vegetasjon
	Andre planter må brukes i kaldt klima enn temperert klima
Betydelige snømengder	Høy avrenning ved snøsmelting og regn-på-snø tilfeller
	Høy forurensningsbelastning ved snøsmelting
	Andre problemer med salt/avisingstiltak
	Snøhåndtering kan påvirke lagringsvolumet i BMPs

2.3.1 Gjenfrysing av filtermediet

En av de største bekymringene tilknyttet infiltrasjon i kaldt klima er gjenfrysning av filtermediet. Hydraulisk konduktivitet kan synke flere størrelsesordener når jorden fryser (Al-Houri et al., 2009; LeFevre et al., 2009). Betongfrost (*eng. concrete frost*) oppstår når jorden er vannmettet, og fører til nærmest impermeabel jord. I umettet jord oppstår porøs og granulær frost, og jorden kan da ha høy infiltrasjonsevne (Muthanna, 2007; Davidson et al., 2008). For å sikre en god ytelse gjennom vinteren er det viktig å unngå betongfrost. Figur 5 viser et gresskledd parkområde i Trondheim hvor infiltrasjonsevnen er så lav at vannet ikke har drenert bort før frosten har kommet.

Roseen et al. (2009) undersøkte en rekke lokale overvannsløsninger i løpet av 2004 til 2006. Det ble funnet at gjennomsnittlig spissvannføringsreduksjon for regnbed var 87 % om sommeren og 77 % om vinteren. Forsinkelsestiden økte fra 1.3 om sommeren til 2.0 om vinter (regnet som tid fra start til sentroide av utløpet dividert på tid fra start til sentroide av innløpet). Frostdybden gikk helt ned til 15 cm i løpet av de to vintersesongene.



Figur 5: Gjenfryst parkområde i Trondheim, 6 mars 2012

Selv om det ikke var frost i jorden i Risvollan regnbed vinteren 2011/2012, er det sannsynlig at jorden vil fryse i løpet av en normal vinter. Et regnbed i Oslo fikk igjenfryst overflaten med 4-5 cm is vinteren 2011/2012 (Kihlgren and Saksæther, 2012). Kihlgren and Saksæther (2012) viser til at regnbed med snødekke kan få et islag på jordoverflaten når temperaturen alternerer rundt null grader. Gary Oberts² (epost, 17.04.2012) sier dette om betongfrost i regnbed:

“The problem with concrete frozen soils is a very real one. My advice always in cold climates is to dry the soil as much as possible heading into winter. This can be achieved with under-drains, diversion of events as winter nears, alteration of irrigation, or use of porous soils. I have found that uniform concrete freezing is usually not the norm in actual field conditions. In most cases within a bioretention cell, there will be differential freezing caused by such variables as mulch density, rodent/worm holes, and vegetative rooting and coverage.”

Det er nærliggende å anta at uniform betongfrost over hele regnbedets areal ikke vil opptre ofte under faktisk feltforhold, fordi filtermediet er inhomogent. En mulighet i dimensjoneringen av regnbed er å ta hensyn til at deler av regnbedet vil ha betongfrost i løpet av vårsmeltingen.

2.3.2 Snøvolum

På grunn av forurensninger i snøen er det ønskelig å infiltrere smeltevann fra snø fremfor å dumpe det i sjøen. Muthanna (2007) fant at hvis mer enn 25 % av årlig

²Gary Oberst, urbanhydrolog, epost 17. april 2012, globerts@gmail.com

snømengde skal lagres i regnbed ville dette bli den dimensjonerende parameteren for regnbed i Trondheim. Hvor mye snø som må lagres for å infiltrere all snøen i løpet av en vinter avhenger av hvor mange smelteperioder som inntreffer i løpet av vinteren. Ulempen med å lagre snø i regnbed er at veisalt i snøen kan ødelegge vegetasjonen i regnbed (Caraco and Claytor, 1997).

2.3.3 Andre utfordringer

For den hydrologiske ytelsen er regn-på-snø-tilfeller kritisk. Temperaturen er lav (lavere infiltrasjonsevne) og avrenningen stor. Flere andre utfordringer for regnbed i kaldt klima går på renseseffekten. For eksempel hvordan regnbed kan håndtere “first flush” effekten fra nedbørstilfeller og om regnbed kan brukes til lagring av spesielt forurenset snø. En bekymring er veisalt i smeltevannet (Marsalek, 2003; Marsalek et al., 2003). Paus viste i sine kolonneforsøk (Paus, 2011) at høye saltkonsentrasjoner i smeltevannet kan mobilisere tungmetallene Cd, Zn og Cu som er adsorbent til filtermediet, slik at disse tapes fra regnbedet. Salt som infiltrerer ned til grunnvann er også en bekymring (Oberts, 2003).

3 Metode

For å finne dimensjoneringsgrunnlag for regnbed i Norge er det valgt fem metoder som alle ser på den hydrologiske effekten av regnbed. (1) Langtidsovervåking av Risvollan regnbedet vil danne grunnlag for å kalibrere en modell av regnbed. I tillegg vil dataene si noe om hvordan infiltrasjonsevnen varierer gjennom året. (2) Infiltrasjonsforsøk med Modified Phillip-Dunne infiltrrometer (MPD) i regnbedet vil gi informasjon om hvordan infiltrasjonsevnen varierer på overflaten i regnbedet og gjennom året. (3) Infiltrasjonsforsøk i laboratoriet vil si noe om hvilken effekt kompostandelen i filtermediet har på infiltrasjonsevnen. (4) simulering av smeldata og IVF-kurver fra Bergen, Trondheim og Oslo vil avdekke regionale forskjeller i regnbeds ytelse. (5) Simulering av styrt regn vil vise regnbeds evne til spissvannføringsreduksjon.

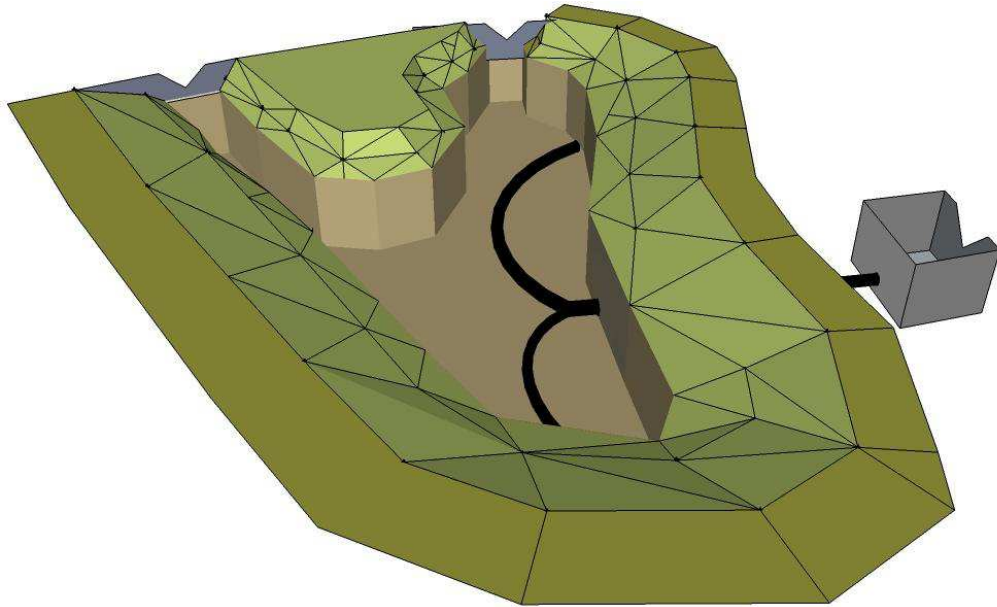
3.1 Feltbeskrivelse av Risvollan regnbed

Regnbedet på Risvollan er bygd opp av et filtermedium bestående av sandig matjord med 25 volumprosent kompost, en vanntett PE-membran som skiller filtermediet fra omkringliggende masser samt vegetasjon på overflaten av filtermediet. Vannet føres inn i regnbedet via en gresskledd vannveg (*eng. swale eller wadi*). I regnbedet vil vann fordampe, bli tatt opp i plantene eller filtreres ned til to drenerør i bunn. Overskytende vann vil gå i overløp. På denne måten blir overvannet håndtert lokalt, samtidig som det bidrar til å redusere avrenningen fra området. Ved siden av at flomtoppene reduseres, vil biologiske, kjemiske og fysiske prosesser i regnbedet holde igjen mange av forurensningene i overvannet. Risvollan regnbed (figur 6 og 7) er installert med tre skarpkantete V-overløp i rustfritt stål. Innløpet har 150° vinkel, overløpet har 120° vinkel og drenerutløpet har 90° vinkel. Ved hjelp av hver sin trykksensor måler disse vannføringen inn, ut og i overløp. Vannmengden ut er vann som infiltreres gjennom filtermediet, samles opp av to drenerør og renner over et V-overløp nedstrøms. En vanntett PE-membran sørger for at vann ikke infiltrerer til grunnvann. Dermed har man god kontroll på vannbalansen i regnbedet. Vannbalansen blir følgende

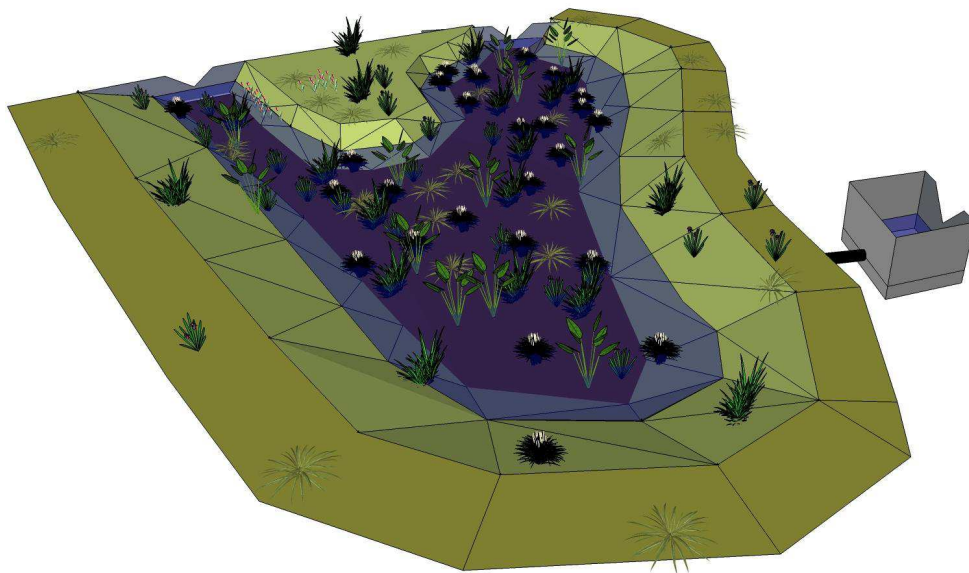
$$0 = Q_{innløp} + N_{regnbed} - Q_{overløp} - Q_{Drenersutløp} - E - \Delta S \quad (14)$$

Q er vannmengde i V-overløpene, $N_{regnbed}$ er nedbør som faller direkte på regnbedet, E er evapotranspirasjonen og ΔS er endring i vannmengde lagret i regnbedet. Alle leddene blir beregnet om til m³. Fordampningen for høsten 2011 er estimert i prosjektoppgaven høsten 2011 basert på Penman-Monteiths ligning og måledata fra Risvollan Urbanhydrologiske målestasjon.

Figur 6 og 7 viser en 3D-figur av regnbedet laget basert på GPS-innmålinger (Leica GPS). V-overløpet inn er til venstre, overløpet ut midt på og vann som infiltrerer renner ut i V-overløpskassen til høyre.



Figur 6: Risvollan Regnbed uten filtermediet, V-overløp inn til venstre, V-overløp ut midt på. Infiltrert vann samles i drensrør (svarte) og renner ut i overløpskassen til høyre.



Figur 7: Risvollan regnbed med filtermediet og planter på toppen under et nedbørstilfelle

Vedlegg 3 inneholder en kort 3D video av Risvollan regnbed. Tabell 5 gir en oversikt over instrumenteringen på Risvollan regnbed.

Tabell 5: Oversikt over instrumentering på Risvollan Regnbed

Type instrument	Produsent
3 stk trykksensorer	AquiStar SDI-12 Pressure & temperatur (måleområde 0-1 m)
2 stk jordtemperaturmålere	Pt 100 4 leder (dybde 5 cm og 50 cm)
1 stk. Lufttemperaturmåler	Hvit strålingskjerm, ukjent produsent
1stk. Jordfuktighetsmåler	Vegetronix VH400 Soil Moisture Sensor Probes (5 cm dybde)
Data-overføring	Overføring via mobiltelefon til NVE's database Hydra 2 hvert døgn.
Datalogger	Sutron 9210 Xlite
Korttids nedbør	Lambrecht, hentes fra Risvollan målestasjon

Vannhøyden foran V-overløpene blir kontrollert ved NVE av forsker Bent C. Braske-rud basert på manuelle kontrollmålinger utført av Torstein Dalen i perioden august 2011 til mars 2012 (figur 8). Vannhøyden foran V-overløpene ble brukt i overløpsformelen fra NS-ISO (2005)

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \tan \frac{\phi}{2} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (15)$$

Hvor $Q(m^3/s)$ er vannføring, $\mu(-)$ er en overløpskoeffisient basert på vinkelåpning, vannhøyden og bredden på kanalen foran V-overløpet, $\phi(\text{grader})$ er vinkelåpningen på V-overløpet, $g(m/s^2)$ er gravitasjonskonstanten og $h(m)$ er effektiv vannhøyde foran V-overløpet.



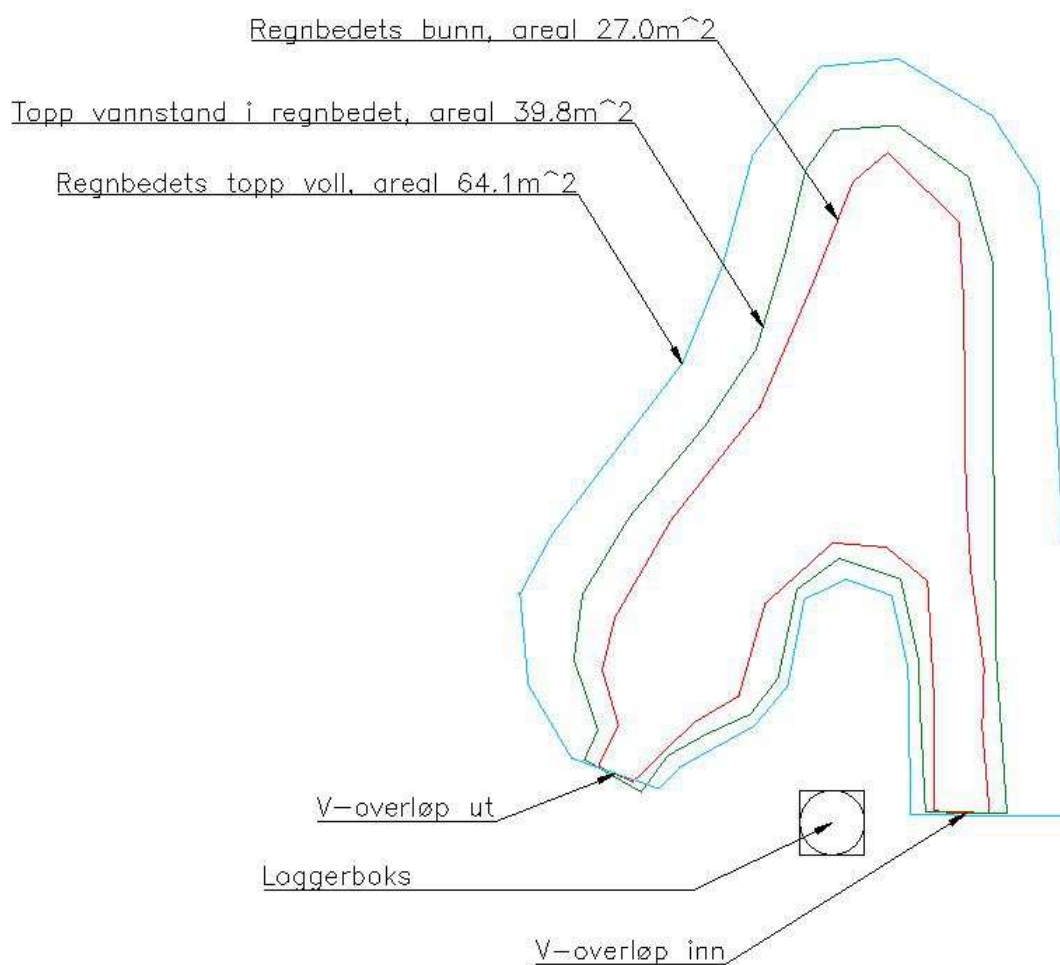
Figur 8: Manuell kontroll av vannhøyden foran V-overløp

3.1.1 Geometriske forhold

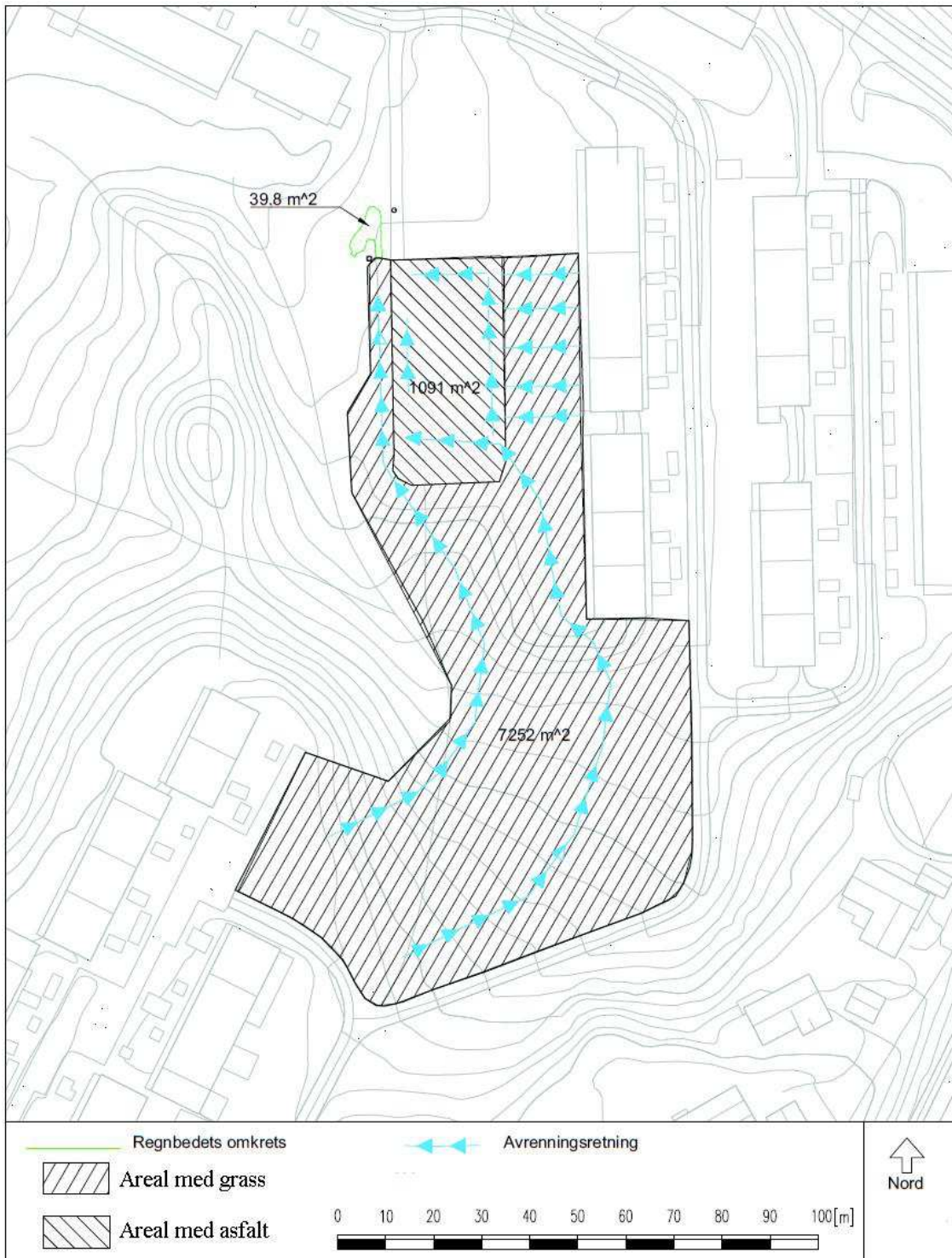
Regnbedets og nedbørsfeltets geometriske forhold ble kartlagt i prosjektoppgaven. Figur 9 og 10 viser de geometriske forholdene målt inn med GPS. Tabell 6 gir en oversikt over de geometriske forholdene.

Tabell 6: Risvollan Regnbeds geometriske forhold

	Membran bunn	Regnbed bunn	Areal topp vannstand
Areal (m ²)	34.3	27	39.8
Høyde over havet (m)	116.45	117.20	117.36
	Filtermediet	Overflate lagring	Totalt
Volum (m ³)	5.2	7.8	13.0
	Asfalt	Gress	Totalt
Nedbørsfeltets areal (m ²)	1091 (13%)	7252 (87%)	8343



Figur 9: Risvollan Regnbeds arealer



Figur 10: Risvollan Regnbeds nedbørsfelt

3.2 Simulering

Valg av simuleringverktøy

Richards ligning (Richards, 1931) beregner vannstrøm i porøst medium. Løsningen av Richards ligning krever en del parametere som vanligvis ikke er kjent for jordmediet. Richards ligning kan løses analytisk ved å anta en skarp vannfront som infiltrerer ned i jordmediet. Dette senker behovet for parametere som trengs for å løse ligningen. Denne løsningen kalles Green-Ampts ligning (Green and Ampt, 1911):

$$f(t) = K \left[\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (16)$$

Her er $K(cm/t)$ vannmettet hydraulisk konduktivitet, $\psi(cm)$ tensjon, $f(t)(cm/t)$ infiltrasjonsraten og $F(t)(cm)$ vannmengden som er infiltrert. $\Delta \theta$ er forskjellen mellom initielt vanninnhold og vannmettet vanninnhold.

Bruken av Green-Ampt i regnbed fører med seg en rekke usikkerheter i beregningen av infiltrasjonshastighet. (1) Green-Ampt antar en skarp vannfront, noe som i seg selv er en forenkling. (2) Green-Ampt beregner infiltrasjonshastigheten i 1D. Dermed tas det ikke hensyn til varierende initelt vanninnhold, varierende dybde på vannfronten i jorden og varierende vanndybde over arealet. Horizontal vannstrøm tas heller ikke med. (3) Regnbed er sjeldent helt flate. Dermed vil vannhøyden over jorden variere i regnbed. Warrick et al. (2005) viste at forskjellen ved å bruke gjennomsnittelig vanndybde eller varierende vanndybde i Green-Ampts ligning er liten (2,9% avvik i kumulativ infiltrasjon). (4) Infiltrasjonsraten varierer på overflaten blant annet på grunn av planters vekst, gjentetting av overflaten og at jord er inhomogen (Dingman, 2002). (5) Grunnvannsstanden må være tilstrekkelig dypt under jordoverflaten hvor infiltrasjonen skjer Lee (2011).

RECARGA er en datamodell av regnbed utviklet ved University of Wisconsin-Madison (Dussaillant et al., 2005). Modellen beregner vann i overløp, drenerør og infiltrasjon til grunnvann ut fra nedbørsdata eller tilrenningsdata fra bruker. Inngangsdata kan enten være enkelthendelser eller lengre serier på flere år. RECARGA bruker Green-Ampts (Mein and Larson, 1973) ligning for infiltrasjon fra overflaten og van Genuchten's ligninger (van Genuchten, 1980) for perkolasjon mellom jordlagene (opp til tre jordlag). Beregningene gjøres i 1D. Dussaillant et al. (2005, 2003) viste at RECARGA (som bruker Green-Ampt) gir et godt estimat på infiltrasjonsraten sammenlignet med programmet Recharge (som bruker Richards ligning). I denne oppgaven er det valgt å benytte RECARGA.

3.2.1 Beregninger i RECARGA

I dette kapittelet vil ligningene som styrer beregningene i RECARGA bli gjennomgått. Ligningene er gjengitt i RECARGAs brukermanual (Atchison and Severson, 2004).

RECARGA tar inn nedbør eller direkte tilrenning til regnbedet som timesverdier. Deretter deles timesverdiene opp i 15 minutters intervaller for å øke stabiliteten og nøyaktigheten til beregningsrutinen (Dussaillant, 2012). Ved enkle endringer i koden kan man benytte minuttverdier som inngangsdata til programmet, og programmet

vil da dele minuttverdiene i 15 sekunders intervaller og kjøre dataene gjennom beregningsloopen.

Tilrenning

RECARGA bruker SCS-metoden å beregne tilrenningen til regnbedet fra permeable flater (Atchison and Severson, 2004).

SCS avrenningsberegning for permeable flater er

$$W_i = \frac{(P_i - 0.2 \cdot S_{d,permeabel})^2}{P_i + 0.8 \cdot S_{d,permeabel}} \quad (17)$$

$$S_{d,permeabel} = \frac{100}{CN} - 10 \quad (18)$$

$$w_i = W_i - W_{i-1} \quad (19)$$

Hvor W_i er kumulativ avrenning (mm), P_i er kumulativ nedbør (mm), $S_{d,permeabel}$ er en benevningsløs parameter, CN er kurveltallet (-) og w_i avrenning i tidssteget i. For impermeable flater gjelder følgende beregning:

$$\frac{dS_{d,imp}}{dt} = ET_{ave} \quad (20)$$

$$S_{d,imp} = \min\left(\int ET_{ave}, S_{max,imp}\right) \quad (21)$$

$$W_{j,max} = \max(P_j - S_{d,imp}, 0) \quad (22)$$

$$w_i = W_i - W_{i-1} \quad (23)$$

Her er $S_{d,imp}$ (mm) gropmagasinering på overflaten, ET_{ave} (mm/time) er gjennomsnittelig fordampning og P_j (mm) er kumulativ nedbør.

I denne oppgaven er vannmengder målt i innløpet til regnbedet blitt brukt til kalibrering av RECARGA. Derfor har heller ikke beregningsrutinen for avrenning fra nedbørsfeltet blitt benyttet.

Fordampning

Fordampningen beregnes som

$$Q_e = E_{max}(1 - (1 + A_w))^{1/m} \quad (24)$$

$$A_w = \frac{\theta - \theta_{pwp}}{\theta_{fc} - \theta_{pwp}} \quad (25)$$

Her er E_{max} (mm/time) maksimal fordampning fra input-filen, θ er vanninnholdet, θ_{pwp} er vanninnholdet ved visnepunktet og θ_{fc} vanninnholdet feltkapasiteten.

Vannmengder

RECARGA antar at konsentrasjonstiden er neglisjerbar. I denne oppgaven benyttes vannmengder målt ved innløpet, og dermed er antakelsen korrekt for mine beregninger. Vannmengder inn i regnbedet kan da beregnes som:

$$Q_{in} = Q_{rain} + Q_{runon} \quad (26)$$

Hvor Q måles i cm vann fordelt over hele nedbørsfeltet per time $\left(\frac{cm}{m^2time}\right)$.

Infiltrasjonshastighet

RECARGA bruker Green-Ampt (Mein and Larson, 1973) til å beregne infiltrasjonshastigheten. Følgende formler benyttes:

$$\frac{dF(t)}{dt} = i \quad (27)$$

$$\frac{dF(t)}{dt} = K_{sat} \cdot \left(1 + \frac{B}{F(t)}\right) \quad (28)$$

$$B = (h_{wf} + h_s(t))(\theta_{sat} - \theta_{ini}) \quad (29)$$

Her er i (cm/time) infiltrasjonshastigheten, $F(t)$ (cm) kumulativ infiltrasjon, K_{sat} (cm/time) er vannmettet hydraulisk konduktivitet, h_{wf} (cm) er tensjonen ved vannfronten, $h_s(t)$ (cm) av vannhøyden på overflaten, θ_{sat} (-) er vannmettet vanninnhold og θ_{ini} er vanninnholdet ved $t=0$.

RECARGA beregner infiltrasjon gjennom tre jordlag (rotsone, lagersonne og insitu masser). RECARGA antar at infiltrasjonen er drevet av gravitasjon (hydraulisk gradient lik 1), og bruker van Genuchten's formler (van Genuchten, 1980).

$$K(\theta) = K_{sat} \cdot \theta^{1/2} (1 - (1 - \theta^{1/m})^m)^2 \quad (30)$$

$$\theta = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (31)$$

Her er m den såkalte van Genuchten parameteren som avhenger av jordtypen og θ_{res} er vanninnholdet ved feltekapasiteten. RECARGA justerer infiltrasjonen for de andre lagene hvis ett av lagene begrenser infiltrasjonen.

Hvis man legger inn et drenerør i rotsonen vil RECARGA beregne vannføringen ut av drenerøret med følgende formel:

$$U(t) = C_0 \cdot A \cdot H_u^{3/2} \quad (32)$$

Her $U(t)$ (cm/time/A), A (m^2) regnbedets areal, H_u (cm) vannhøyden over drenerøret. Hvis det ikke er vann på overflaten av regnbedet, beregnes H_u som rotsonevanninnhold multiplisert med rotsoneens dybde. C_0 er en konstant.

Vannbalanse

For å beregne vannmengder i overløp og vannhøyde i regnbedet trengs det en vannbalanse. RECARGA beregner følgende vannbalanse:

$$A \frac{dh_s}{dt} = Q_{rain} + Q_{runon} - Q_{infiltration} - Q_{runoff} \quad (33)$$

Hvor A (m^2) er regnbedets areal.

3.2.2 Kalibrering av RECARGA

Ved hjelp av målingene fra V-overløpene høsten 2011 har Recarga blitt kalibrert. Regnbedets areal, maksimal vannstand, porevolum og filterdybden til Risvollan regnbed har blitt målt inn. Kun vannmettet hydraulisk konduktivitet gjenstår som ukjent parameter for å kalibrere RECARGA. Hydraulisk konduktivitet kan optimaliseres for å best mulig simulere forsinkelsestiden, reduksjonen i spissvannføring, vannstand i regnbedet, dreneringstid, vannmengde i overløp og vannmengde infiltrert. En av utfordringene i kalibreringen av RECARGA mot vannføringsmålingene ligger i å finne objektive kriterier for god kalibrering. Metoder basert på minste kvadrat-avvik kan for eksempel gi en dårlig tilpasning for vannmengde i overløpet hvis det er en forsinkelsestid mellom målte og estimerte verdier, selv om selve forløpet er godt modellert. Å kalibrere med hensyn på total vannmengde infiltrert og i overløp kan gi veldig feil estimering av spissvannføringen og vannhøyden i regnbedet. I tillegg kan en hydraulisk konduktivitet som gir en god tilpasning til overløpshydrogrammet gi en dårligere tilpasning til drenshydrogrammet. Det er derfor valgt å kalibrere ved hjelp av visuell vurdering av grafer for vannstand i regnbedet og vannføringer inn og ut av regnbed, samt totale vannmengder. Følgende prosedyre er valgt for kalibreringen:

1. Vannflaten varierer mellom $27m^2$ og $39.8m^2$. Tidlig i kalibreringen ble det klart at $27m^2$ infiltrasjonsareal gav best tilpasning til dataene, og dette er derfor brukt videre.
2. Bruk prøve-feile metoden for å finne vannmettet hydraulisk konduktivitet. Helningen på grafen til vannstanden i regnbedet påvirkes sterkt av valgt vannmettet hydraulisk konduktivitet, og egner seg som et første estimat.
3. Ved å gjøre små endringer (2-3%) på hydraulisk konduktivitet kalibreres totalt vannmengde infiltrert.
4. Kontroller målte og estimerte utløpshydrogrammer.
5. Gjenta punkt 2, 3 og 4 måned for måned og for alle månedene samlet.

3.2.3 Mål på hvor god kalibreringen er

Den hydrologiske ytelsen kan måles som reduksjon i spissvannføring, forsinkelse av flomtoppen og vannmengde infiltrert. En korrekt estimert utløpshydrogram er utgangspunktet for å estimere reduksjon i spissvannføring og forsinkelsestid. I denne

oppgaven er Nash-Sutcliffe koeffisienten (Nash and Sutcliffe, 1970) brukt til å si noe om hvor godt RECARGA estimerer avrenningshydrografen:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_{\text{simulert}} - Q_{\text{målt}})^2}{\sum(Q_{\text{målt}} - \bar{Q}_{\text{målt}})^2} \quad (34)$$

Her er $Q(l/min)$ vannføring og $\bar{Q}(l/min)$ gjennomsnittlig vannføring. En R^2 på 1 vil da bety 100% korrelasjon.

3.3 Regionale forskjeller i regnbeds ytelse basert på nedbørs og smeldata

Denne metoden vil belyse regionale forskjeller mellom Bergen, Trondheim og Ås. Dette ble gjort som et case-tilfelle:

- Regnbed med 20 cm maksimal vannstand, 75 cm filtermedie. Varierende hydraulisk konduktivitet.
- Regnbedets areal varierer mellom 0.5% og 10% av nedbørfeltets størrelse.
- Drensrør i bunn av regnbed. Antar at drensrøret ikke begrenser infiltrasjonskapasiteten i regnbedet.
- Nedbørsfelt på 1.0 ha impermeable flater med avrenningskoeffisient lik 1.
- Ytelsen blir evaluert ved å se på total vannmengde infiltrert og maksimal dreneringstid beregnet med RECARGA.
- Fordampningen er neglisjert.
- Inngangsdata er avrenningsserier på tre år fra smeldebrett.

Det er flere grunner til at drensrør er tatt med: (1) I kaldt klima vil det antakeligvis være nødvendig med drensrør for å opprettholde infiltrasjonsevnen gjennom hele året. Ett drensrør vil sørge for at vann drenerer hurtigere ut, og dermed kan betongfrost (grunnet høyt vanninnhold) unngås. (2) Der hvor in situ masser har lav infiltrasjonsevne bør drensrør brukes. (3) Sterkt forurenset overvann bør infiltreres i regnbed med tett membran rundt filtermediet og drensrør i filtermediet. På den måten unngår man å forurense grunnvannet.

Nedbørsfelt på 1.0 ha er brukt for enkelthets skyld. The Prince George County Stormwater Manual (TPGC, 2007) anbefaler maksimalt 0.4 ha nedbørsfelt (100 % impermeabelt) fordi store vannhastigheter ved ekstremhendelser kan gi erosjonsskader for større felt. Dette løses ved å bygge flere mindre regnbed oppstrøms i nedbørsfeltet. Prosentandel regnbed av nedbørsfeltet må fortsatt være det samme, uavhengig av antall regnbed. 100 % impermeable flater med avrenningskoeffisient på 1 er brukt fordi man da unngår usikkerheten med fordrøyningsberegning på overflaten, samt at smeltevannsmålingene fra smeldebrettene kan brukes direkte som inngangsdata i RECARGA. (Smeltevannsbrettet er en impermeabel flate)

Fordampning fra overflaten på regnbedet og i nedbørsfeltet ble neglisjert i simuleringene pga. av manglende fordampningsdata på timesbasis for de aktuelle årene. Dette innebærer at vanninnholdet i regnbedet vil være noe høyere ved starten på en nedbørshendelse i simuleringen i forhold til virkeligheten, fordi vann som har fordampet mellom nedbørshendelsene ikke er tatt hensyn til. Etter en nedbørshendelse vil vann som kunne ha fordampet bli beregnet som infiltrerte vannmengder, og dermed ha lite å si for årlig vannmengde i overløp. Derimot vil vannmengder infiltrert være lavere enn estimert, fordi en del av vannet fordampes. Siden fordampning i nedbørsfeltet er neglisjert vil vannmengdene i innløpet også være noe høyere.

Smeltesdata fra Risvollan målestasjon for årene 1998, 2000 og 2002, Sandsli målestasjon for årene 2002, 2003 og 2004 og Rustadskogen målestasjon 2008, 2009 og 2011 er brukt. Disse årene hadde lavt avvik mellom målinger fra smeltebrettet og lambrecht nedbørsmålere, og dataene ansees derfor som gode. Et lite avvik mellom smeltebrett og lambrecht måleren på årsbasis må forventes da det kan ligge snø på brettet ved årsskiftet. Dataene fra målestasjonene er satt sammen til en fil for hver målestasjon. Deretter er RECARGA blitt brukt til å simulere dataene på timesbasis (minuttsbasis vil kreve veldig lang simuleringstid). Dette er blitt gjort for en hydraulisk konduktivitet på 1.4cm/t, 2.5cm/t, 10.0cm/t og 20cm/t, samt for regnbedareal fra 0.5 til 10 %.

Smeltesdata

Smeltesdataene er i timesoppløsning. Smeltevannsmengden er målt ved hjelp av et snøsmeltebrett på 1.5mx1.5m som er koblet til et kar. Vannstanden i karet logges og økningen i vannstand brukes til å beregne smeltevannsmengden. Dermed vil smeltesdataene tilsvare vannmengden som renner av en impermeabel flate, og er en direkte måling av vinteravrenningen. Gitt en konstant hydraulisk konduktivitet gjennom året, vil simuleringene gi svar på hvor mye vann som kan forventes infiltrert i regnbed i løpet av årets fire sesonger.



Figur 11: T.v. Smeltevannsbrettet på Rustadskogen (foto Bent C. Braskerud). T.h. smeltevannsbrettet på Risvollan (foto Torstein Dalen)

3.4 Estimering av regnbeds ytelse under styrtregn

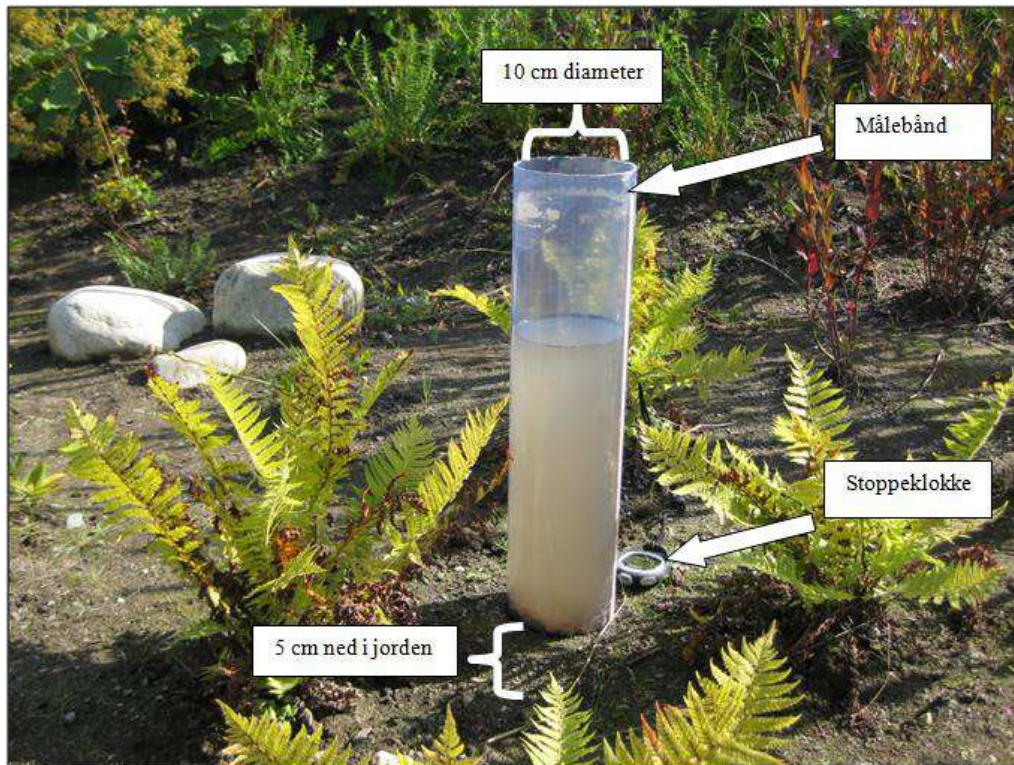
For å estimere regnbeds ytelse under større nedbørshendelser er det valgt ut en nedbørshendelse fra Trondheim. Beregningen er gjort ved hjelp av RECARGA og hendelsen er simulert med minutt-tidssteg. Hendelsene er simulert for samme case som ved langtidssimulering, dvs samme areal på nedbørsfelt, maksimal vannstand i regnbed og varierende regnbed areal. Eneste forskjellen er at nedbørshendelsen kun er simulert med en vannmettet hydraulisk konduktivitet på 10.0 cm/t. En vannmettet hydraulisk konduktivitet på 10.0 cm/t kan med riktig valg av filtermateriale og med drenerør kunne oppnås. Til sammenligning målte Asleson et al. (2009) en geometrisk gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet på 12.0 cm/t for 8 regnbed i Minnesota, USA. Infiltrasjonstester i laboratoriet tilsier også at en hydraulisk konduktivitet på 10.0 cm/t kan oppnås i regnbed (kap. 4.6).

Valg av hydrologisk tilstand i regnbedet ved nedbørens start er vanskelig. Kan man forvente at regnbed er drenert tomt for vann ved starten på et 10 års regn? Muthanna (2007) fant at tiden fra forrige nedbørstilfelle korrelerte med observert forsinkelsestid i sin studie av to regnbedbokser på Risvollan. Her er det derfor valgt å ta med nedbøren som falt dagen før nedbørshendelsen slik at dette blir bestemmende for hvilket vanninnhold og evt. vannstand i regnbedet ved nedbørshendelsens start. Dette er gjort for å best mulig kunne vise den faktiske forsinkelsestiden og spissvannføringsreduksjonen regnbed vil ha under det aktuelle nedbørstilfellet. Fordampningen er neglisjert av samme grunn som ved simulering av regionale forskjeller i regnbeds ytelse.

Nedbøren er hentet fra 28. og 29. juli 2007 (eKlima, 2012). Hendelsen tilsvarer et tre timers langt 15års regn (25.8mm), hvor de mest intense 30 minuttene tilsvarer ca et 7 års regn (13.1mm).

3.5 Modified Philip-Dunne Infiltrometer

Figur 12 viser en MPD brukt til å måle og kartlegge infiltrasjonsraten i Risvollan regnbed. MPD er et infiltrometer utviklet ved University of Minnesota som måler infiltrasjonsevnen i et punkt på jordoverflaten. I denne studien ble det benyttet MPD infiltrometer med høyde ca. 50 cm og med 10 cm omkrets. Før man begynner målingene må volumetrisk vanninnhold i jorden måles (Dette er gjort ved å ta jordprøver og måle vanninnhold i laboratoriet). Deretter ble MPD-kolonnen plassert fem cm ned i jorden, og ble videre fylt med vann til 43 cm over jorden. Vannstanden ble lest av med jevne mellomrom frem til røret er tomt. Det trengs minst tre målinger (start, midt og slutt) for å regne ut konduktivitet og tensjon (Munoz-Carpena et al., 2002, sitert av Nestingen 2007). For å registrere hvordan vannstanden endrer seg over tid er det festet et målebånd på utsiden av MPD-kolonnen. Til slutt måles vanninnhold i jorden der MPD-kolonnen stod. Jorden er da vannmettet.



Figur 12: Modified Phillip-Dunne Infiltrometer i bruk. Foto: Torstein Dalen

Resultatene fra en MPD-test brukes til å estimere vannmettet hydraulisk konduktivitet og tensjon ved hjelp av Green-Ampts ligning og Darcys lov. Dette er gjort ved en matlabkode skrevet av Kim Paus (Paus, 2010). Matlabkoden er basert på Nestingens analyse av MPD'en (Nesting, 2007), som igjen er modifikasjon av Philips analyse av Philip-Dunne permeater (Philip, 1993). Det henvises til (Nesting, 2007) for en mer detaljert utledning, verifisering og usikkerhetsvurdering ved gjennomføring av MPD-forsøk.

3.6 Infiltrasjonsforsøk i laboratoriet

Dette kapitlet vil beskrive oppsettet og gjennomføringen av infiltrasjonsforsøket i laboratoriet. Kort oppsummert baserer forsøket seg på en modifisert versjon av infiltrasjonsforsøket beskrevet i Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011).

3.6.1 Materialer

Materialene som er brukt er sand og løvkompost fra Forseth Grus AS. Både sand og kompost er siktet på en 2 mm kvadratisk sikt, og kun materialet under 2 mm er benyttet. Filtermedium fra Risvollan Regnbed, ren sand fra Forseth og filtermedium med 10, 30 og 50 volumprosent løvkompost ble testet. Av kompostblandingen ble det laget tre like kolonner av hver blanding, slik at usikkerheten i målingene kan bli beskrevet. Ren sand og Risvollan filtermedium ble det bare laget en kolonne av. Totalt ble det 11 kolonner. En prøve fra hver filterblanding ble siktet for å sammenligne kornkurvene. Kolonnene var 50 cm høye med en indre diameter på 4.4 cm. Ca 5 cm grus (3-6 mm) ble lagt i bunn som et drenslag og deretter ca 25 cm filtermateriale. Tilgjengelig vannvolum på overflaten tilsvarer da ca 20cm.

Første gang vann infiltrerer gjennom kolonnene vil noe finstoff vaskes ut, samt at filtermediet vil komprimeres noe (ca 2 cm). Derfor ble først en mengde vann infiltrert gjennom alle kolonnene og tiden for å infiltrere 5.0 cm vann ble målt. Filtermediets dybde ble også målt. Dette ble gjentatt en gang hver dag frem til det ble målt samme tid for å infiltrere 5.0 cm vann og samme filterdybde to dager på rad. Kolonnene ble da ansett som stabile, dvs. at ingen endringer i filterdybde eller utvasking av finstoff vil skje under videre forsøk.

3.6.2 Gjennomføring av forsøk

På forhånd bestemmes porevolum og initialt vanninnhold ved hjelp av Ogata-Banks ligning (Ogata and Banks, 1961) og vekt av kolonnene. Dette er beskrevet senere i kapitlet. Kolonnen er bygd som vist på figur 13. Gjennomføringen av forsøket er relativt enkel: Vann helles oppi kolonnen til kolonnen er fylt (figur 13). Deretter noteres vannhøyden og tidspunkt kontinuerlig frem til vannnivå null. Dataene fra en gjennomføring (høyde, tid og initialt vanninnhold) brukes til å beregne tensjon og vannmettet hydraulisk konduktivitet slik som beskrevet i neste kapittel.



Figur 13: Forsøksoppsett, kolonne med filtermediet samt plass til vann på toppen. Foto: Torstein Dalen

3.6.3 Beregning av tensjon og vannmettet hydraulisk konduktivitet

Beregning av tensjon og vannmettet hydraulisk konduktivitet baseres i dette forsøket på Green-Ampts ligning (Green and Ampt, 1911). Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011) viste i artikkelen “Estimating Soil Hydraulic Parameters By Using Green and Ampt Infiltration Equation” en ny metode (MH-metoden) for å bestemme vannmettet hydraulisk konduktivitet og tensjon ved hjelp av infiltrasjonsforsøk og Green-Ampts ligning. Dette forsøket skiller seg fra Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011) sitt forsøk ved at vannet infiltrerer ovenifra og at vannhøyden varierer. Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour gjennomførte sine forsøk med konstant vannhøyde (head) og infiltrasjon fra bunn av filtermediet. Ulempen med infiltrasjon ovenifra er at luftbobler kan fanges inni filtermediet og at vannet kan finne større strømningsveier (makroporer). Fordelen med infiltrasjon ovenifra og varierende vannhøyde er at forsøkene er lettere å utføre og trenger mindre utstyr. Her vil beregningen til Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011) bli kort gjennomgått.

Utgangspunktet er Darcys lov

$$i = K \frac{H + L - \psi_f}{L} \quad (35)$$

Hvor i (cm/t) er infiltrasjonsraten, K (cm/t) er hydraulisk konduktivitet, H (cm) er trykkehøyden, L (cm) er avstanden til vannfronten og ψ_f (cm) er tensjonen ved vannfronten.

Når man antar en skarp vannfront vil denne endre seg i henhold til følgende ligning.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{i}{\Delta\theta} \quad (36)$$

Hvor $\Delta\theta$ er endring i vanninnhold, det vil si porevolum minus initial vanninnhold. Ved å sette ligning 36 inn i ligning 35 og deretter integrere, ender man opp med følgende.

$$\Delta\theta \left[L + (H - \psi_f) \cdot \ln \left(1 - \frac{L}{H - \psi_f} \right) \right] = Kt \quad (37)$$

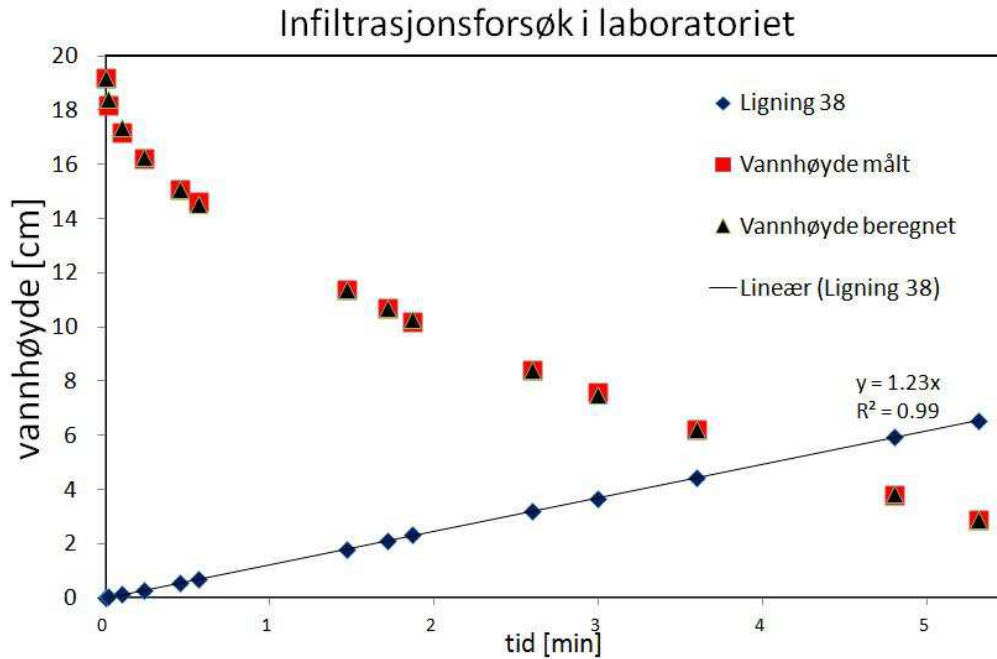
Her er t tid (timer). I dette forsøket vil det være lettere å måle vannmengde infiltrert fremfor å måle hvor langt vannfronten har infiltrert fordi infiltrasjonen skjer ovenifra. Vannmengde infiltrert vil være $H_{\text{initiell}} - H_i$, hvor H_i er vannhøyde ved tid i . Avstanden til vannfronten (L (cm)) vil være $\frac{I}{\Delta\theta} = L$, hvor I (cm) er vannmengde infiltrert. Ved å sette dette inn i ligning 37 får vi:

$$I - \Delta\theta \cdot (H - \psi_f) \cdot \ln \left[1 + \frac{I}{\Delta\theta \cdot (H - \psi_f)} \right] = Kt \quad (38)$$

Her er vannhøyden H (cm), infiltrert vannmengde I (cm) og tid t (timer) resultatet fra forsøket. Dette settes inn i venstresiden i ligning 38. Her er det viktig å merke seg at venstresiden av ligning 38 vil gi en rett linje i et diagram, hvor stigningstallet er lik hydraulisk konduktivitet (høyre side av ligningen). Fremgangsmåten for å finne hydraulisk konduktivitet og tensjon blir da:

1. Gjøtt en tensjon (ψ_f).
2. Beregn venstre siden av ligning 38.
3. Trekk en rett linje gjennom punktene til ligning 38.
4. Hvis alle punktene havner på en rett linje (ligning 38 er en lineær funksjon av tid), er tensjonen som i punkt 1 og hydraulisk konduktivitet er stigningen til linjen. Havner ikke punktene på en rett linje må en ny tensjon gjettes.

Her er det valgt å bruke Nash-Sutcliffe kriteriet for å finne den "rettteste" linjen (ligning 34). Figur 14 viser MH-metoden anvendt på jordprøver fra Risvollan. Resultatet viser en god tilpasning, med en Nash-Sutcliffe koeffisient på 0.999 når tensjonen var -51.7 cm. Stigningen på regresjonslinjen gir en hydraulisk konduktivitet på 1.23 cm/time. Plottet av målt vannhøyde og estimert vannhøyde fra Green-Ampt med tensjon på -51.1 cm og K_{sat} på 1.23 cm/time viser at estimering av K_{sat} og tensjon stemmer bra..



Figur 14: Resultater fra infiltrasjonsforsøk viser at MH-metoden gir ett godt estimat på tensjon og hydraulisk konduktivitet

Videre kan resultat evalueres med tanke på om Green-Ampt med tilhørende estimerte parametere kan gjengi måleresultatene på en god måte. Det kan enten gjøres subjektivt ved å studere grafer som den i figur 14, eller man kan bruke objektive kriterier. Det finnes flere måter å gjøre det på, blant annet Nash-Sutcliffe kriteriet, roten av avvik i andre potens og indeks for samsvar (*eng. index of agreement*). Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011) har valgt å bruke indeks for samsvar. Indeks for samsvar (I_a) har blitt utviklet for å måle hvor godt prediksjonen til en modell samsvarer med målte verdier, og ikke korrelasjonen mellom to dataserier (Harmel and Smith, 2007), og egner seg derfor godt i dette tilfellet. I_a beregnes på følgende måte (Harmel and Smith, 2007):

$$I_a = \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{(|O_i - P_i| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (39)$$

Hvor I_a er indeks for samsvar, O_i er observerte verdier og P_i er estimerte verdier. I_a varierer fra 0 til 1, hvor 1 betyr perfekt fit. Indeks for samvar for figur 14 er 1.

Prøve-feile delen av beregningen og kontrollen av estimerte hydraulisk konduktivitet og tensjon er en tidkrevende prosess. Derfor er en matlab-kode som beregner tensjon, vannmettet hydraulisk konduktivitet, R^2 og I_a blitt skrevet (vedlegg 6). Koden leser inn de manuelt målte dataene fra en excel-fil, gjør beregningene og skriver til slutt resultatene til en .txt fil. Matlabkoden er gjengitt i vedlegg 6.

3.6.4 Beregning av andre parametere

Porevolum

Endringen i vanninnhold fra initialt vanninnhold til vannmettet vanninnhold er inngangsdata i MH-metoden. Derfor er det nødvendig å finne porevolumet til kolonnene. Dette er gjort ved hjelp av tracerforsøk. Vann med saltkonsentrasjon 1.0 mg/l ble fylt i kolonnene og vannstanden ble holdt konstant (konstant vannføring). Deretter ble konduktiviteten i vannmengden ut målt med et konduktivitetmeter (type Multi 350 i fra WTW. wtw.com). Ogata Banks ligning (Ogata and Banks, 1961) ble tilpasset resultatet.

$$\frac{C_e}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - v_x t}{\sqrt{4D_x t}} \right) + \operatorname{eksp} \left(\frac{v_x L}{D_x} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{L + v_x t}{\sqrt{4D_x t}} \right) \right] \quad (40)$$

Hvor C_e (mg/l) er saltkonsentrasjons i ut, C_0 (mg/l) er saltkonsentrasjonen i inn, L (cm) er lengden på jordkolonnen, V_x (cm/min) er vannhastigheten i porene, t (min) er tiden og D_x (cm²/min) er dispersjonen i vertikal retning. Dispersjonen (D_x) og vannhastigheten (V_x) ble tilpasset ved hjelp av målsøk og minste kvadrats metode i Excel (vedlegg 5). Når vannhastigheten i porene og vannføringen er kjent, kan porøsiteten beregnes på følgende måte:

$$\phi = \frac{Q}{v_x A} \quad (41)$$

Hvor $\phi(-)$ er porevolum, Q (ml/min) er vannføringen gjennom mediet, V_x (cm/min) og A (cm²) er arealet til kolonnen. Konduktivitetmeteret ble kontrollert med kjente konsentrasjoner salt før bruk (vedlegg 5).

Porevolumet er kun beregnet for kolonnene med ren sand og antatt lik for resten av kolonnene. Som vist av Mohammadzadeh-Habili og Heidarpour (2011) vil en feil estimering av porevolumet kun påvirke estimert tensjon og ikke estimert hydraulisk konduktivitet, fordi parameteren som tilpasses for å få en rett linje er $\Delta\theta \cdot (H - \psi_f)$. Endrer man $\Delta\theta$ vil dette altså dette kun få følger for estimert tensjon, fordi $\Delta\theta \cdot (H - \psi_f)$ uansett må ha den samme verdien for at linjen (ligning 38) skal bli liniær. Estimert tensjon er derfor avhengig av korrekt estimert vanninnhold og porevolum, og er derfor unnlatt rapportert i resultatkapittelet. Hydraulisk konduktivitet vil uansett bli estimert korrekt.

Initialt vanninnhold

For å bestemme initialt vanninnhold ble jordmengden i hver kolonne veid. Vanninnholdet i jorden ble funnet ved å tørke en prøve fra hver jordblanding i tørkeskap på 110 °C i et døgn. Tørrvekten av hver kolonne ble funnet ved å multiplisere tørrvektandelen av jordprøvene (funnet ved tørking i varmeskap) multiplisert med vekten av jordblandingen i hver kolonne. Ved å veie hver kolonne før infiltrasjonsforsøket finner man antall gram vann i hver kolonne. Vekten av kolonnen før forsøk minus tørrvekten av kolonnen er da antall gram vann i filtermediet. Volumetrisk vanninnhold finnes så ut fra følgende ligning:

$$V_w = \frac{m_w}{V_k} \quad (42)$$

Her er $V_w(-)$ volumetrisk vanninnhold i jordprøven, $m_w(g = ml)$ vannmengden i kolonnen og $V_k(ml)$ volumet av filtermediet. Beregningene av tørrvekt i kolonnene og resultatet fra tørkeprøvene er gjengitt i vedlegg 7.

Estimering av organisk materiale i filterprøvene

For å finne andelen organisk materiale i filterprøvene ble det utført en glødetapstest ved analyselaboratoriet ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk, NTNU. Prøvene ble først tørket ved 105°C i et døgn for å dampe vekk vannet. Deretter ble de veid før og etter oppvarming i ovn på 550°C i to timer. Vektdifferansen er glødetapet. Glødetapet regnes som andelen organisk innhold i prøven. Glødetapstest er blant annet beskrevet i Statens Vegvesens håndbok 014, kap. 14.445.

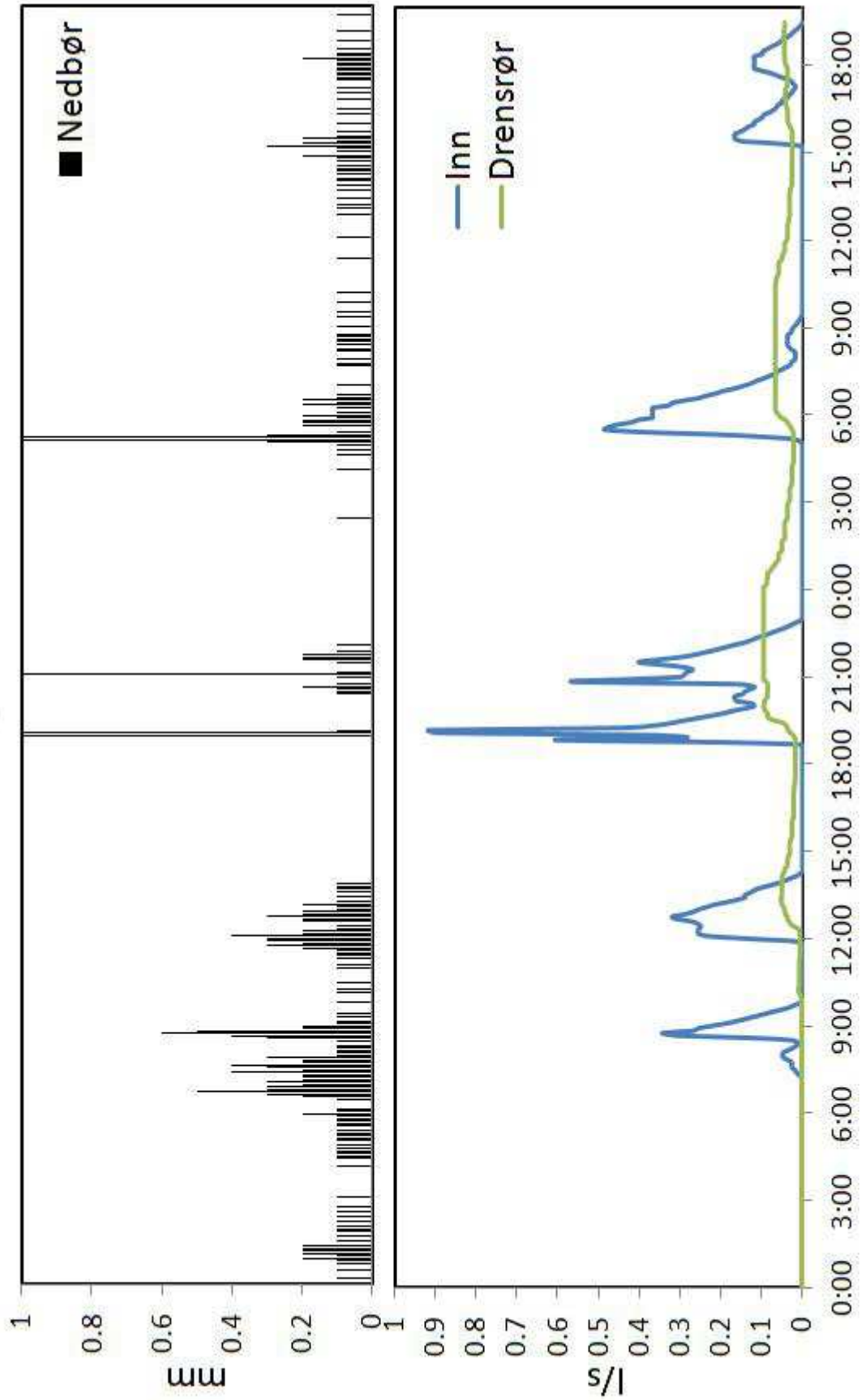
4 Resultater og diskusjon

I dette kapitlet vil resultatene fra kontinuerlige målinger, simuleringer, feltforsøk og laboratorieforsøk presenteres. Diskusjon og kommentarer direkte knyttet til resultatene er tatt med i dette kapitlet.

4.1 Kontinuerlige målinger

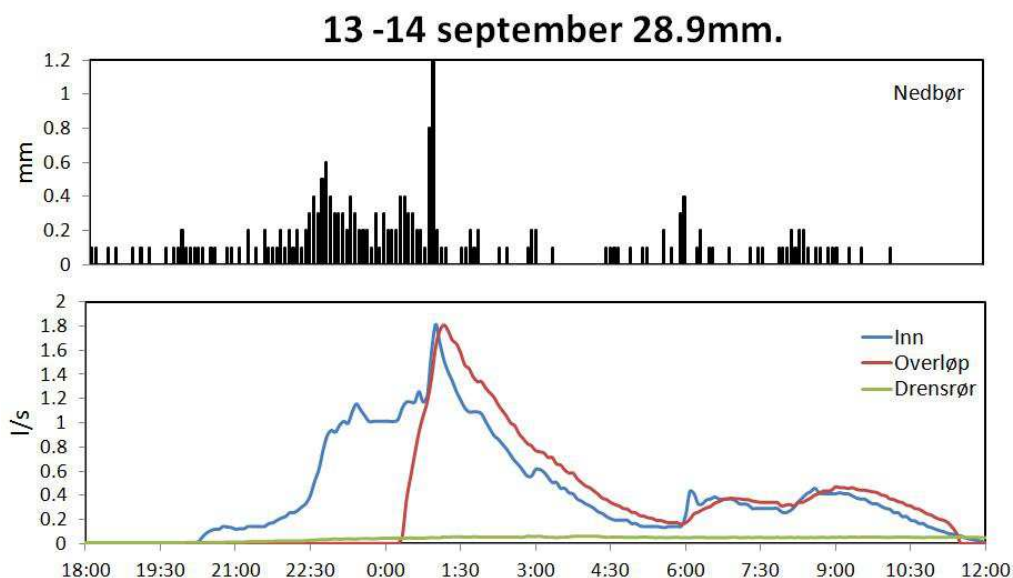
To eksempler på håndtering og tolkning av data er gitt i dette avsnittet. Figur 15 viser nedbørshendelsen 8-9 august 2011. Totalt kom det 39.9 mm fordelt på flere regn og over 24 timer. Ettersom regnbedet fikk noen timer mellom hver nedbørshendelse til å drenere vekk vann, klarte regnbedet å håndtere all nedbøren uten at noe gikk i overløp. Totalt rant 9.7 m³ vann inn i regnbedet hvorav 5.5 m³ infiltrerte. De resterende 4.2m³ vann ble lagret i regnbedet og drenerte ut etter kl 19.30 9. august (figur 15).

8-9. august 39.9mm.



Figur 15: Nedbørshendelsen 8-9 august 2011, viser regnbedets gode evne til både fordrøye og redusere spissvannføringen.

Utfordringen for regnbed er når mye vann kommer på kort tid, samtidig som spissvannføringen inn i regnbedet kommer etter at regnbedet er fullt. Nedbørshendelsen 13-14 september (figur 16) viser et tilfelle hvor spissvannføringen inn i regnbedet kommer etter at regnbedet er fullt. Dermed blir spissvannføringsreduksjonen null. Beregner man forsinkelsestiden som tiden mellom sentroiden til vannmengden inn og vannmengden ut, vil man se at regnbedet har en fordrøynings-effekt. Figur 16 viser et tilfelle hvor total vannmengde inn, i overløp og drenerør var henholdsvis 28m³, 22.6m³ og 2.8m³.



Figur 16: Nedbørshendelse 13-14 september 2011, viser at utfordringen for regnbed er når flomtoppen kommer etter at regnbedet er fullt.

Det man ser av figur 15 og 16 er at det ikke bare er den totale mengden nedbør, men også tid mellom nedbørshendelsene og varigheten som avgjør ytelsen til regnbedet. I tillegg er avrenningskoeffisienten veldig forskjellig for de to nedbørstilfellene. Årsaken er at nedbørsfeltet (87 % gress), den gresskledd kanal som fører vann inn i regnbedet samt en del lokale senkninger i terrenget kan lagre en del vann. Dermed vil vannmengdene i nedbørsfeltet ved starten på det aktuelle nedbørstilfellet bety mye for spissvannføringsreduksjonen i regnbedet.

Observasjoner

Figur 17, 18 og 19 viser hvordan Risvollan regnbed forandrer seg i løpet av vinterhalvåret.



(a) 24. August 2011



(b) 27. September 2011



(c) 9. Oktober 2011

Figur 17: Risvollan Regnbed ved forskjellige årstider (foto Torstein Dalen)



(a) 16. November 2011



(b) 15. Desember 2012



(c) 18. Februar 2012

Figur 18: Risvollan regnbed ved forskjellige årstider (foto Torstein Dalen)



(a) 9. Mars 2012



(b) 22. Mars 2012



(c) 24. April 2012

Figur 19: Risvollan regnbed ved forskjellige årstider (foto Torstein Dalen)

Datainnhenting i kaldt klima byr på en rekke utfordringer. Figur 20 og 21 oppsummer utfordringene med målinger i kaldt klima. I hovedsak går det på at V-overløpene snør ned slik at det oppstår kanalstrømning over V-overløpet, dvs. at vannstrålen ikke blir luftet. Dermed vil målingene fra trykksensorene ikke kunne brukes til å estimere vannføringen. Store mengder sørpe og snø i regnbedet som demmer opp vann som strømmer inn gjør at vannstanden i regnbedet kan være forskjellig fra regnbedets innløpsparti til utløpet. Dette gjør at en kalibrering mot vannstanden i regnbedet gir usikre resultater. Varmekabelen til dremsutløpet mistet strømforsyningen en periode slik at vannet i V-overløpet frøs. Dette ble rettet opp 8. mars 2012. På grunn av nevnte faktorer ble vannføringen i perioden 1. desember 2011 til 20. mars 2012 svært usikker, og ble i hovedsak fjernet.



(a) Snø og sørpe i regnbed gir forskjellig vannstand ved innløp og utløp



(b) Gjenfryst V-overløp etter drenerøret



(c) Snø på innsiden og utsiden av regnbedet gir kanalstrømning i overløpet

Figur 20: Vanskeligheter med vintermålinger (foto Torstein Dalen)



(a) Snø på innsiden og utsiden av regnbedet gir kanalstrømning ved innløpet



(b) Nedsnødd drensutløp



(c) Trykksensor til overløp plassert i rør med innløpshull 6 cm over regnbedoverflaten.

Figur 21: Vanskeligheter med vintermålinger (foto Torstein Dalen)



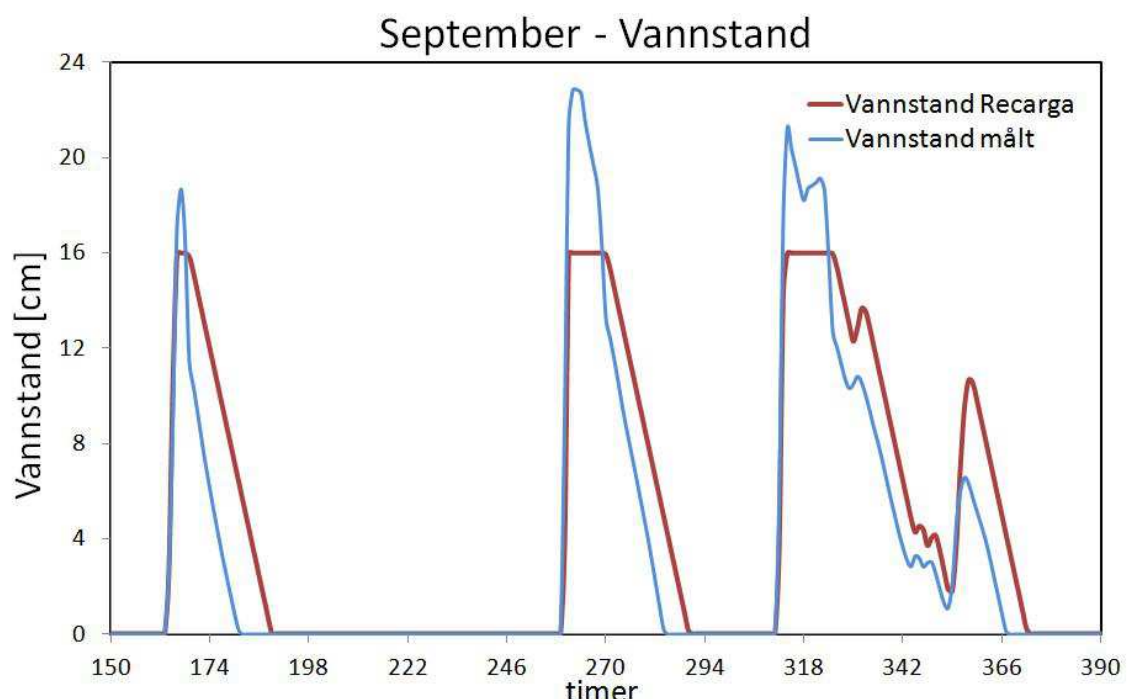
Figur 22: Sørpe har smeltet rundt plantene. 22. mars 2012 (foto Torstein Dalen)

Kaldeste temperaturen målt i regnbedet (5 cm under jordoverflaten) vinteren 2011/2012 var -1.8°C . Totalt var det fem målinger (15 min oppløsning) med minusgrader i filtermediet på Risvollan. Ingen av målingene var sammenhengende. Det vil si at den lengste tiden filtermediet opplevde minusgrader var 15 min. Dermed kan det antas at det ikke oppstod frost i regnbedet, og at betongfrost ikke har oppstått. Temperaturdata fra Voll målestasjon (eKlima, 2012) viser at f.o.m. desember t.o.m. mars var gjennomsnittlig månedstemperatur målt 5 cm under bakken minusgrader i perioden 1959-67, noe som tyder på at frost på Risvollan vil oppstå i år med normaltemperatur.

4.2 Kalibrering av RECARGA

Tidssteg på en time

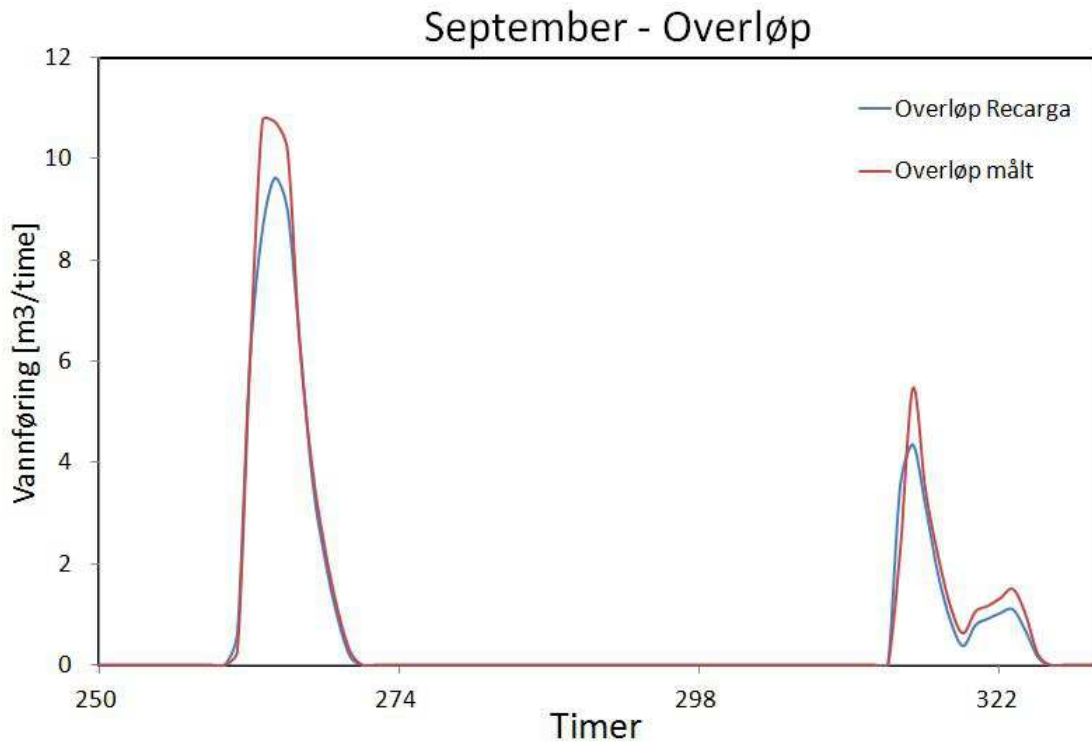
Ved å bruke metoden beskrevet i kapittel 3.3.2 er målingene høsten 2011 simulert ved hjelp av RECARGA. Vedlegg 7 inneholder resultatet fra alle simuleringene. Målingene for høsten 2011 er simulert to ganger. Først er RECARGA kalibrert måned for måned for å avdekke endring i vannmettet hydraulisk konduktivitet. Deretter er alle månedene simulert samtidig med en konstant vannmettet hydraulisk konduktivitet for å evaluere hvordan RECARGA egner seg til langtidssimuleringer. Det er ikke muligheter for å legge inn varierende vannmettet hydraulisk konduktivitet i RECARGA. Figur 23 viser vannstanden i den fuktigste måneden.



Figur 23: Vannstanden i regnbedet i September, Simulert og virkelig.

Maksimal vannstand i regnbedet er satt til 16.0 cm i RECARGA. Når vannstanden øker forbi 16.0 cm vil RECARGA beregne alt overskytende vann som vann i overløp og sette vannstanden til 16.0 cm. Dermed vil vannstanden være konstant 16.0 cm i RECARGA i perioder med vann i overløp. I tillegg er det verdt å merke seg at for de målte dataene gjør vannstanden et bratt fall på vei ned fra 16.0 cm til ca 14 cm, mens RECARGA beregner ett jevnt fall. En mulig årsak er at RECARGA ikke tar hensyn til regnbedets geometri. Det vil si at RECARGA antar loddrette kanter i regnbedet. Dermed vil målte data vise en vannstand som synker raskere ved den vannstanden der kantene er skrå (mindre volum som må infiltreres for å senke vannstanden) og saktere der kantene er mer loddrette, mens RECARGA vil beregne et jevnt fall i vannstanden.

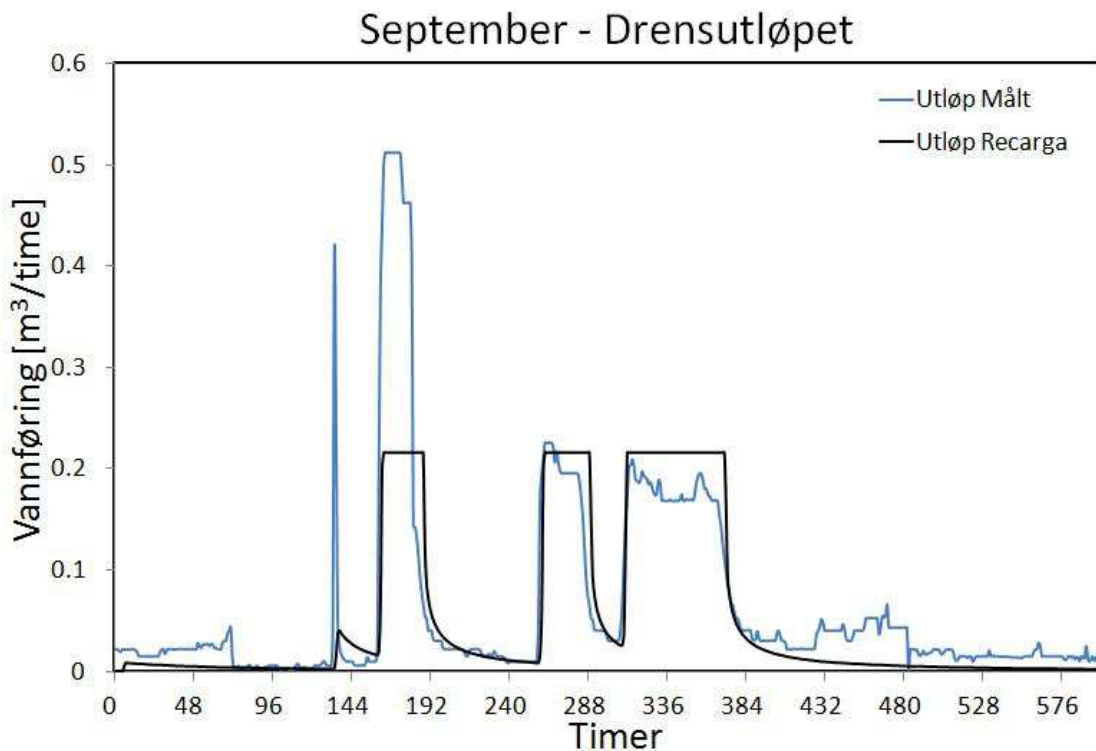
Figur 24 viser hendelsesforløpene i september hvor vann har gått i overløp.



Figur 24: Vann i overløp i september

RECARGA underestimerer vannmengden i overløp (figur 24). Selve hendelsesforløpet med tidspunkt for spissvannføring, start og avslutning for vann i overløp blir godt simulert. Det er flere mulige årsaker til underestimeringen av vannmengde i overløp. 1) Feil estimering av konstanten i vannføringsformelen for V-overløpet (ligning 15). 2) For få/dårlig kalibrering av trykksensoren som måler vannstanden foran V-overløpet. 3) Høy vannstand i regnbedet kan påvirke målingene av vannmengde inn slik at disse underestimeres. Dermed underestimeres også vannmengde i overløp. Dette gjelder kun ved høy vannstand i regnbedet (ca 24 cm), fordi fallhøyden fra V-overløpet inn til vannoverflaten blir liten. 4) Det faktum at vannstanden i regnbedet er høyere enn 16.0 cm gir større vannlagring i regnbedet (ca. $0.4\text{m}^3/\text{cm}$ vannhøyde) enn det RECARGA bruker i simuleringen. 5) Bunnarealet benyttet til beregningene i RECARGA er 27.0 m^2 , mens arealet ved 16.0 cm vannstand er 40 m^2 . På grunn av slakk helning på regnbedets kanter øker arealet vannet kan lagres over når vannstanden stiger (ca 7.5% volumøkning).

Figur 25 viser vannmengdene i drensutløpet som er målt og simulert.

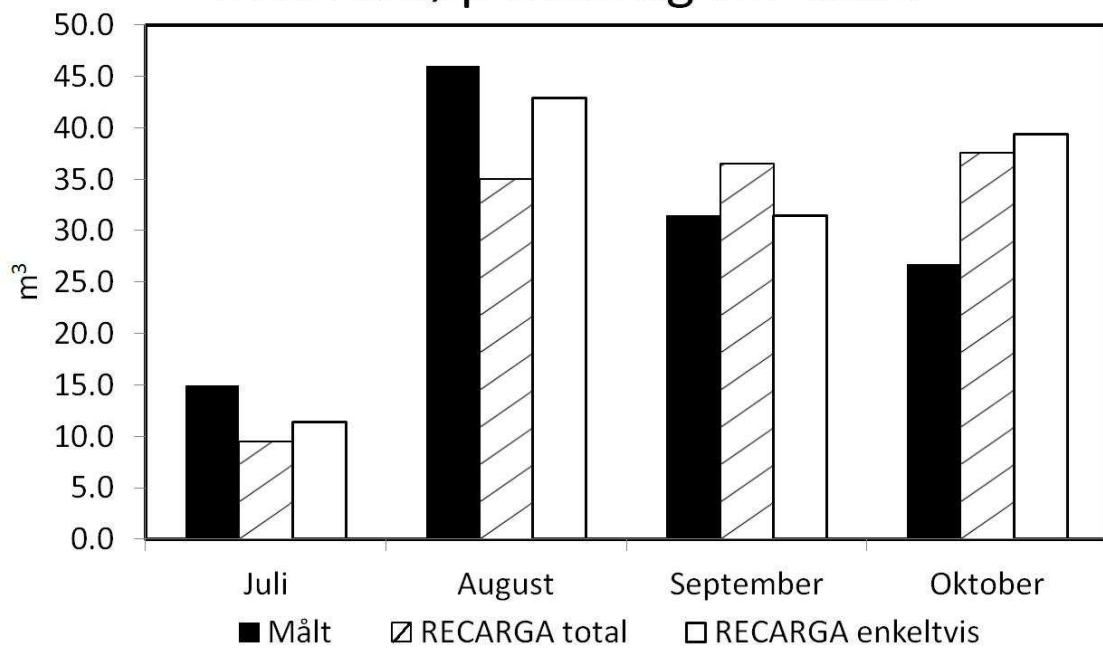


Figur 25: Vannmengder i drensutløpet

Årsaken til flate partier med vannføring i drensutløpet for simulerte verdier ligger i måten RECARGA beregner drensvannføringen. Maksimal vannføring i drensrøret beregnes etter ligning 32, hvor vannføringen beregnes ut fra en trykkehøyde bestående av vannstand i regnbedet pluss filtermediets dybde. Hvis det ikke er vannstand i regnbedet beregnes maksimal vannføringen i drensrøret fortsatt ut fra ligning 32. Trykkehøyden er da relativ vannmetning multiplisert med filterdybden. Når maksimal vannføring i drensrøret er bestemt for det aktuelle tidsskrittet, blir den faktiske vannføringen bestemt av enten maksimal vannføring beregnet eller av vannmengden infiltrert. Dermed fanger ikke RECARGA opp de små variasjonene i vannføringen i drensrøret. RECARGAs beregning i 1D tar heller ikke hensyn til varierende vannfront i regnbedet. Spissvannføringen i drensrøret blir da heller ikke spesielt godt estimert.

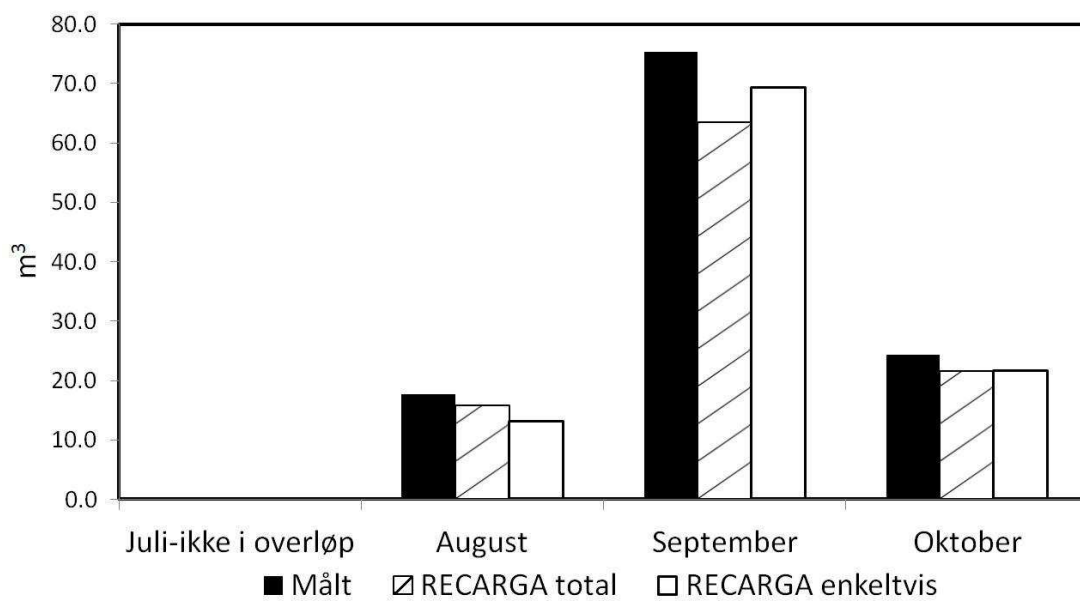
Figur 26, 27 og 28 oppsummerer målte og simulerte vannmengder høsten 2011.

Drensutløp målt og simulert

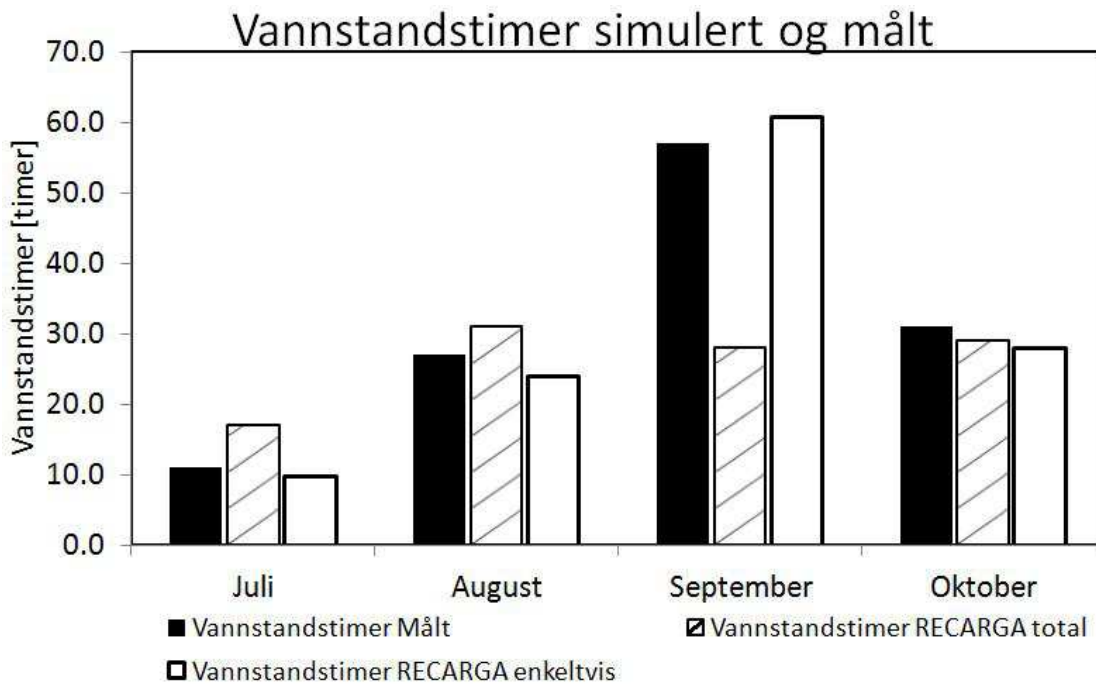


Figur 26: Vannmengder i drensutløp: målt og simulert

Overløp målt og simulert



Figur 27: Vannmengder i overløp: målt og simulert



Figur 28: Maksimal vannstandstimer estimeres godt med månedvis kalibrering.

Av figur 26 og 27 ser vi at både vannmengder i drensløp og overløp simuleres godt både ved langtidssimulering av alle månedene og månedvis simulering med varierende vannmettet hydraulisk konduktivitet. Overløpet underestimeres litt i alle månedene. Dette fører til et avvik på 14% totalt for alle fire månedene. Årsaken er antakeligvis at valgt overløpskoeffisient for målte data er noe for høyt. Vannmengder i drensutløpet estimeres godt foruten oktober. Vannbalansen for de målte dataene hadde et avvik på 15% i oktober, noe som tilsier at vannmengden er feil målt i et eller flere overløp.

Figur 28 viser derimot at vannstandstimene ikke estimeres like godt når man simulerer alle fire månedene i ett. Dette gjelder spesielt september. Årsaken sees i figur 23, hvor de to nedbørshendelsen rundt time 340 overlapper hverandre. Simulerer man med for høy hydraulisk konduktivitet vil disse vannstandshendelsene bli separert fordi regnbedet da dreneres tomt for vann mellom nedbørshendelsene. Den lave hydrauliske konduktiviteten (0.8cm/t) som ble benyttet i den månedsvise kalibreringen av september gir en bedre tilpasning til vannstanden, og estimerer dermed maksimal vannstandstimer bedre.

Tabell 7 og 8 oppsummerer Nash-Sutcliffe koeffisientene for høsten 2011.

Tabell 7: Nash-Sutcliffekoeffisienter for lange dataserier

	Vannstand	Drensløp	Overløp
Juli	0.95	0.70	ikke overløp
August	0.96	0.41	0.86
September	0.86	0.62	0.97
Oktober	0.78	-3.5	0.518
Langtidsserien	0.83	0.26	0.87

Jevnt over så gir RECARGA gode resultater for lange simuleringer. Noe av årsaken er at det i lange perioder ikke er vannmengder i innløpet. Dette gjør at målte og simulerte vannmengder er 0, noe som resulterer i høye Nash-Sutcliffekoeffisienter. Det er registrert vannmengder i drensløp nesten hele høsten. Som forklart tidligere gir RECARGA med timesoppløsning ett dårlig estimat på spissvannføringen i drensrøret, noe som resulterer i lave Nash-Sutcliffe-koeffisienter. I tabell 8 er Nash-Sutcliffekoeffisientene for enkelthendelser i hver måned. Hendelsene er definert som første registrerte eller estimerte vannmengde over 0 for den aktuelle parameteren til siste registrerte eller estimerte verdi over 0. Drensløpet er utelatt da en hendelse i drensløpet etter denne definisjonen ville ha en varighet på en måned, og drensløpet er derfor bare gjengitt i tabell 7.

Tabell 8: Nash-Sutcliffekoeffisienter for simulering av enkelthendelser høsten 2011

Enkelthendelser	Vannstandsdybde	Overløp
Juli	0.85	ikke overløp
August	0.80	ikke overløp
August	0.90	-0.81
August	0.95	0.41
September	0.80	-2.82
September	0.75	0.95
September	0.79	0.84
Oktober	-1.03	ikke overløp
Oktober	0.64	0.19
Oktober	0.67	-0.81
Oktober	0.48	-3.38

Foruten første hendelsen i oktober (tabell 8), estimerer RECARGA vannstanden i regnbedet godt. Første hendelsen i oktober gav en liten vannstand i regnbed, og dermed gav RECARGAs 1-D simulering av regnbedets geometri stort utslag. Både første overløpshendelse i august og september hadde lave vannføringer (maksimal vannføring 0.3 l/s i overløp), noe som gjør at forenklingene i RECARGA gjør utslag i dårlig korrelasjon. Både overløp og drensløp ble dårlig estimert i oktober. Dette skyldes at målte verdier i overløp og drensløp er langt høyere enn estimert ved hjelp av RECARGA. Vannbalansen for målte verdier i oktober har et avvik på 15%. Dermed er det antakeligvis målefeil i et eller flere V-overløp som gir de dårlige Nash-Sutcliffe koeffisientene i oktober.

Tabell 9 oppsummerer kalibreringen for våren 2012. På grunn av bortfall av data er kun 20. mars til 4. april simulert. Perioden er simulert på minuttbasis da det er korte serier og raskt lar seg gjennomføre. Perioden 20. mars til 26. mars ble vannmettet hydraulisk konduktivitet kalibrert til 0.42cm/t, mens den for perioden 27. mars til 2. april ble kalibrert til 0.6cm/t.

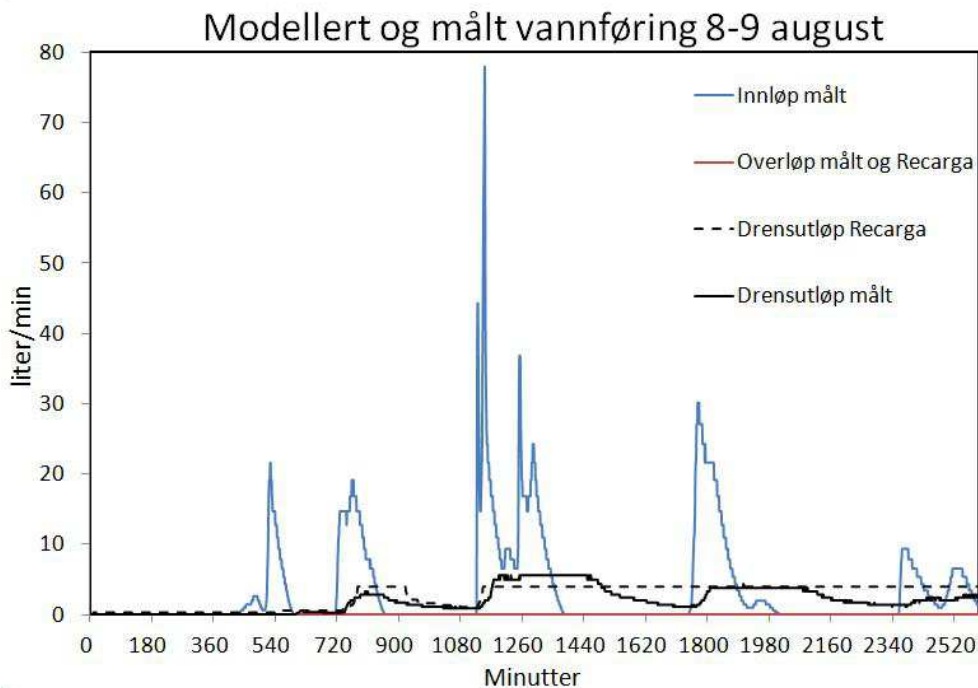
Tabell 9: Nash-Sutcliffe koeffisienter for våren 2012

	Vannstand	Drensutløp	Overløp
20.03.12-26.03.12	0.85	0.64	0.98
27.03.12-02.04.12	0.97	0.79	0.86

Det er noe høyere Nash-Sutcliffe koeffisienter for våren. Årsaken kan skyldes at simuleringen er gjort på minuttbasis.

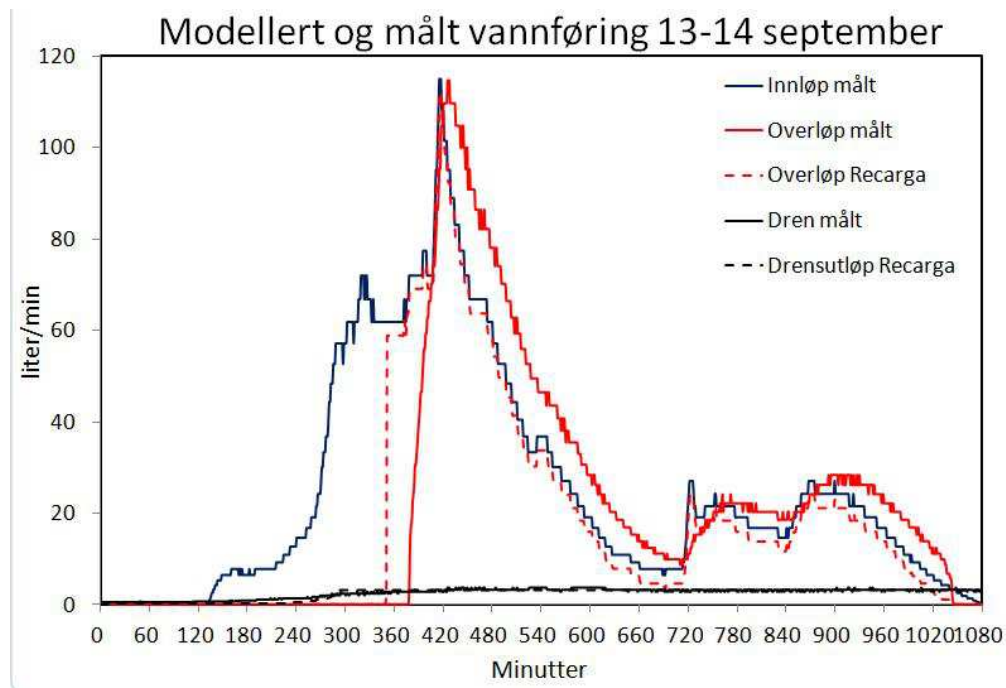
Tidssteg på et minutt

I kapittel 3.1 figur 15 og 16 gjengis to nedbørshendelser fra høsten 2011. Ved å justere tidsskrittet i RECARGA kan man simulere med minuttsoppløsning, tilsvarende oppløsningen til måleinstrumentene på Risvollan regnbed. I figur 29 og 30 er nedbørshendelsene i figur 15 og 16 simulert.



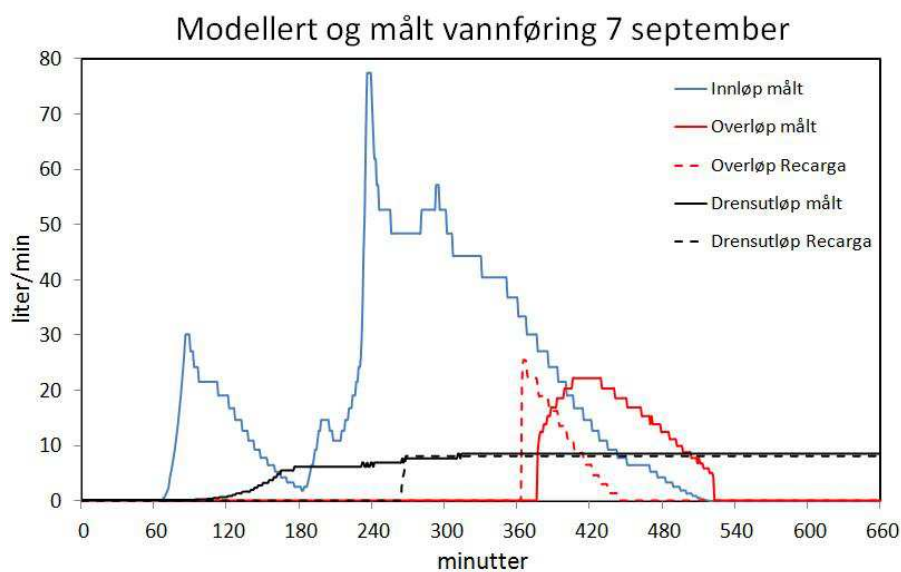
Figur 29: Simulering i RECARGA med minuttsoppløsning viser greit samsvar med målt vannføring i drenerørret.

Variasjonene i vannmengden i drensløpet blir dårlig gjengitt, tilsvarende som ved timesoppløsningen i figur 25. De totale vannmengdene i drensløpet ble 7.1m³ ved simuleringen og 5.2m³ målt. Nash-Sutcliffe koeffisienten for drensløpet var 0.35.



Figur 30: Simulering i RECARGA med minuttsoppløsning viser godt samsvar med målte verdier

Figur 30 viser at hendelser med store vannmengder i overløp blir godt simulert i RECARGA med minuttsoppløsning. Spissvannføringen ut av regnbedet blir godt gjengitt, samt formen på overløpshydrografen. Sammenligner man figur 24 hvor oppløsningen er i timer og figur 30 hvor oppløsningen er minutter, ser man at minuttsoppløsningen estimerer spissvannføringen bedre. Det er verdt å merke seg at den simulerte vannmengden i overløpet aldri overskrider vannmengden inn i det aktuelle tidsskrittet. Dette er tilfelle for de målte verdiene. Årsaken er at RECARGA ikke beregner vannmengden i overløp som funksjon av et V-overløp, men kun bruker massebalanse for overflatelagringen i regnbedet til å beregne vannmengden i overløp. Dermed vil RECARGA heller aldri beregne en vannstand høyere enn maksimal vannstand slik som er tilfellet i praksis. Det er også grunnen til at simulerte vannmengder i overløp ligger under målte vannmengder i figur 24. Totale vannmengder for hendelsen i figur 30 er 19.3 m^3 simulert i overløp, 22.6 m^3 målt i overløp, 2.2 m^3 simulert i drensutløpet og 2.8 m^3 målt i drensutløpet. For figur 30 er Nash-Sutcliffe koeffisienten for overløp og drensutløp henholdsvis 0.71 og 0.85, noe som tilsier en god tilpasning til dataene.



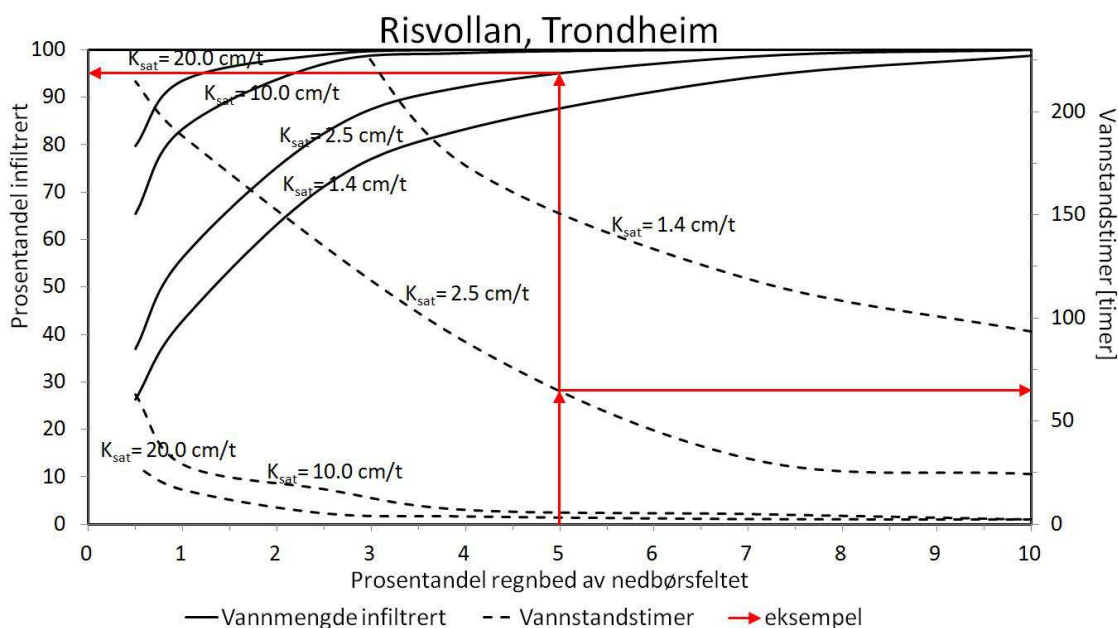
Figur 31: Simulering med minuttsoopløsning 7. september 2011.

Resultatet av nedbørshendelsen 7. september 2011 er vist i figur 31. Nash-Sutcliffkoeffisient for drensløpet er 0.37 og for overløpet -0.25, dvs. en dårlig tilpasning. Den lave Nash-Sutcliffe koeffisienten for drensløpet stammer fra perioden 120 til 250 minutter, hvor RECARGA beregner null vannføring i drensløpet. Årsaken kan være at RECARGA beregner en skarp vannfront i en dimensjon. Det vil si at hele regnbedarealet vil infiltrere ned til drensrøret samtidig, mens i virkeligheten vil vannet starte å infiltrere ved innløpet før det sprer seg utover hele arealet. Når det er vannstand i regnbedet (>250minutter) har RECARGA nærmest en perfekt tilpasning til målte verdier.

Overløpet har en dårlig tilpasning til observerte data hovedsaklig av to grunner. (1) Regnbed arealet i simuleringen er satt til 27.0m^2 , som var det arealet som hadde best tilpasning i langtidssimuleringen av dataene på timesbasis. Dette gir imidlertid ca 1.5m^3 mindre lagringsvolum på overflaten i modellen, noe som gjør at modellen beregner en tidligere start på overløpet. (2) RECARGA kan ikke beregne større vannmengder i overløp enn i innløp, slik det er forklart i tidligere avsnitt. Spissvannføring i overløpet er ellers godt estimert (25 l/min estimert og 22 l/min målt).

4.3 Regionale forskjeller i regnbeds ytelse

Figur 32 viser andelen av årsnedbøren som kan infiltreres og vannstandstimer på Risvollan avhengig av areal og infiltrasjonsevne.



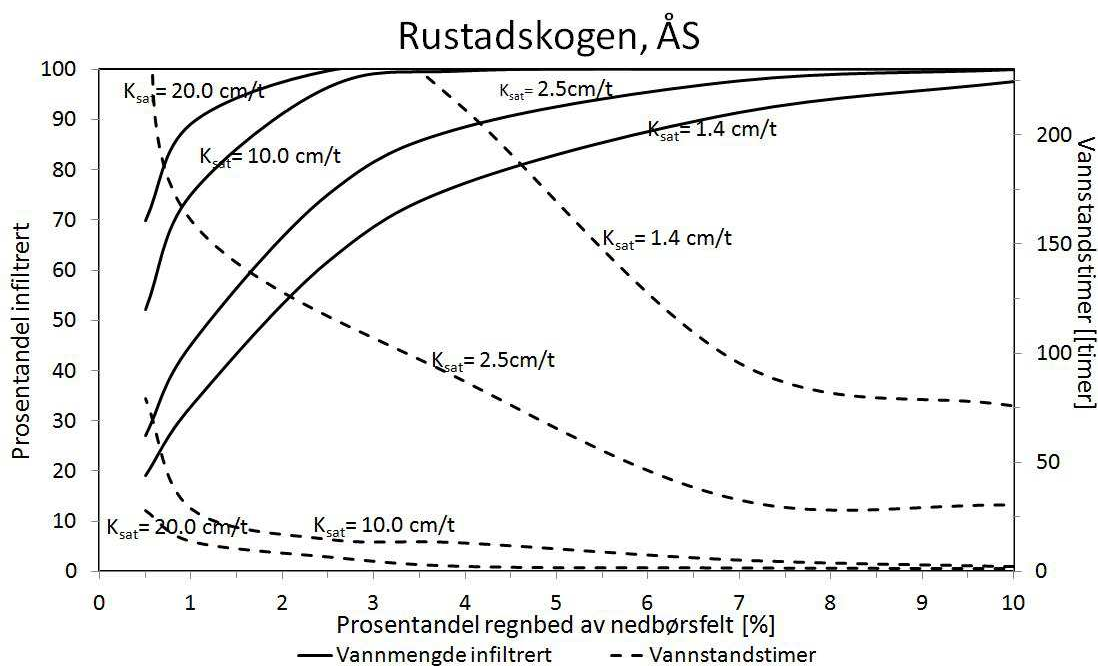
Figur 32: Smelte- og nedbørsdata fra Risvollan, Trondheim simulert i RECARGA viser at små regnbed gir lang dreneringstid og regnbed over 6% av impermeable flater gir liten gevinst i forhold vannmengde infiltrert.

Figur 32 egner seg til å estimere nødvendig størrelse på regnbed for å oppnå forskjellig grad av lokal overvannshåndtering (hvor stor andel av årsnedbøren som håndteres lokalt). I tillegg viser figuren hvilken maksimal vannstandstimer regnbedet antas å ha. For eksempel kan man lese av 5 % regnbedareal av nedbørsfeltet på x-aksen, trekke en strek opp til streken for vannmettet hydraulisk konduktivitet på 2.5 cm/t (hel svart strek) og lese av på venstre y-akse at man da vil kunne infiltrere ca 95 % av årsnedbøren. Tilsvarende finner man ved å trekke en strek fra 5 % regnbedareal opp til 2.5 cm/t vannmettet hydraulisk konduktivitet (svart stiplet linje) og lese av på høyre y-akse, at maksimal tid med vannstand i regnbed er ca 65 timer. Tilsvarende grafer kan produseres for forskjellige regnbed design; For eksempel en annen maksimal vannstand, med og uten drenerør, med og uten pukkmagasin under filtermediet.

Figur 32 kan for eksempel brukes til å estimere effekten av Risvollan regnbed på årlig avrenning: Nedbørsfeltet til Risvollan regnbed har 13 % tette flater og resten gress. Antar man en avrenningskoeffisient mellom 0.1 og 0.2 for gresset, kan man grovt estimere en avrenning fra Risvollan tilsvarende $(13\% + 0.2 \cdot 87\%)$ 22 til 30% impermeable flater. Risvollan regnbeds bunnareal vil da tilsvare ca 1-1.5% av dette. Av figur 32 kan vi se at 1-1.5 % regnbedareal og hydraulisk konduktivitet på 1.4 cm/t gir en årlig infiltrert vannmengde mellom 43 og 54 %. Til sammenligning infiltrerte Risvollan regnbed 52 % av vannmengdene i innløpet høsten 2011.

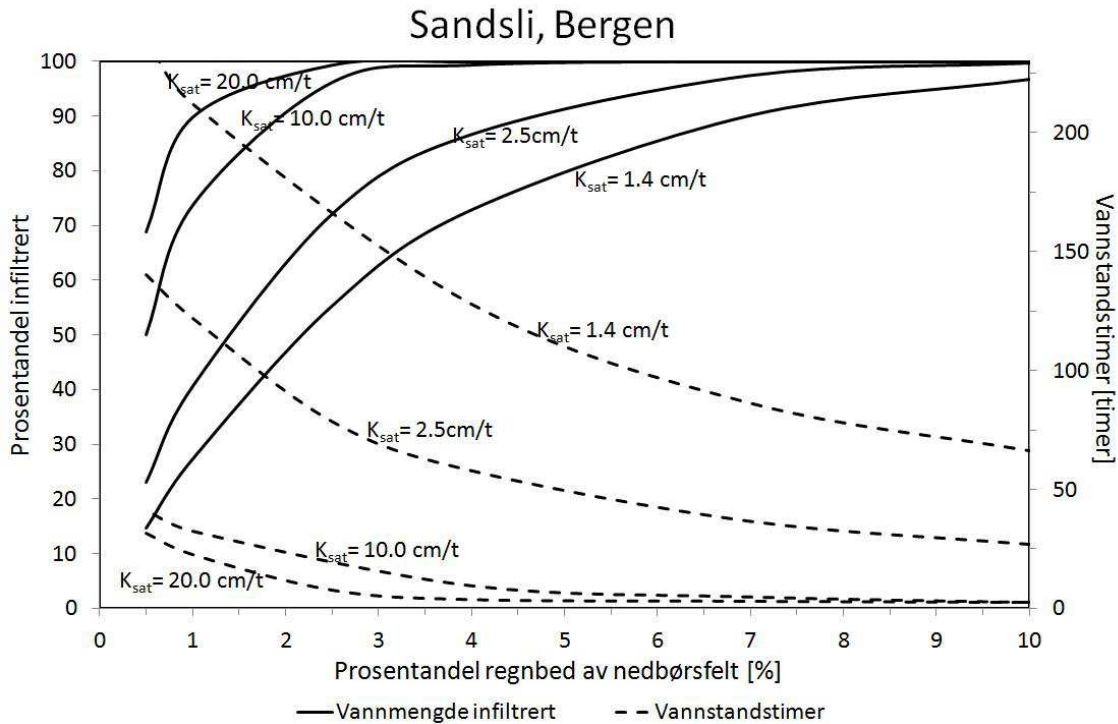
Figur 32 viser at desto mindre regnbed desto lengre maksimal dreneringstid. Årsaken til dette er at regnbedet går raskere fullt og langvarig regn opprettholder vannstanden. Dermed vil maksimal antall timer med vannstand bli lengre, selv om hydraulisk konduktivitet og maksimal vannstand i regnbedet er konstant. For et større regnbed må nedbørsintensiteten være større for å opprettholde vannstanden i regnbedet. Figur 32 viser da at å øke maksimal vannstand i regnbedet for å kompensere for at regnbedet er lite i forhold til nedbørsfeltet vil gi en stor maksimal vannstandstimer, noe som kan drukne plantene.

Figur 33 viser andelen av årsnedbøren som kan infiltreres og vannstandstimer på Rustadskogen avhengig av areal og infiltrasjonsevne.



Figur 33: Smelte- og nedbørsdata fra Rustadskogen, Ås simulert i RECARGA

Figur 34 viser andelen av årsnedbøren som kan infiltreres og vannstandstimer i Bergen avhengig av areal og infiltrasjonsevne.

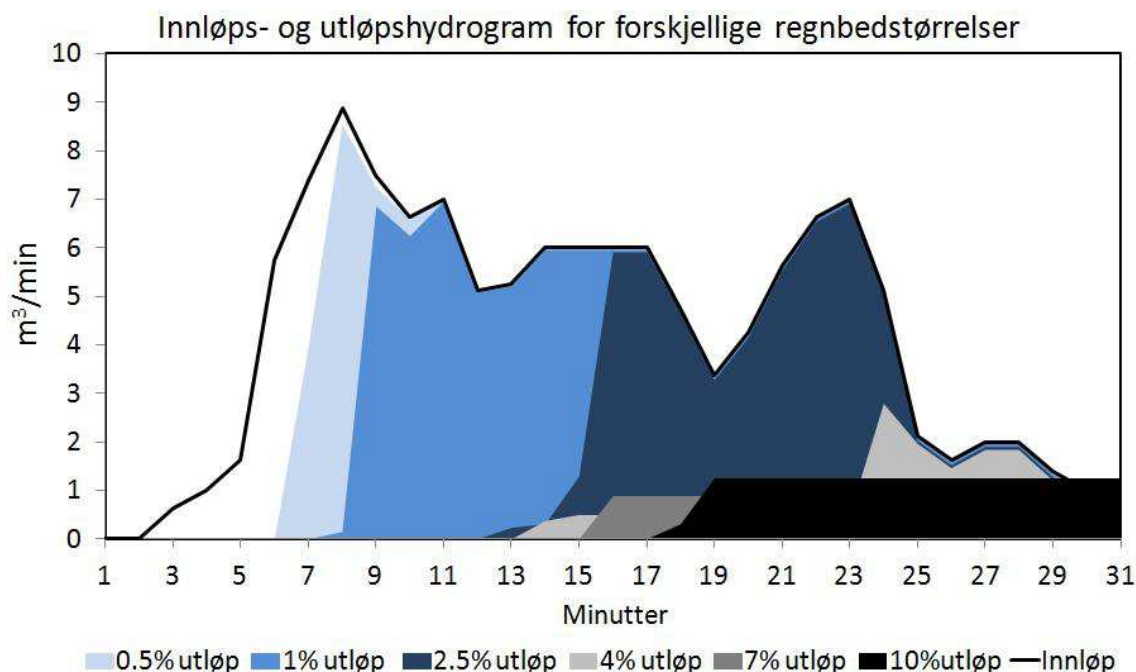


Figur 34: Smelte- og nedbørsdata fra Sandсли, Bergen simulert i RECARGA

Av figur 32, 33 og 34 kan man lese av noen forskjeller i ytelsen til regnbed avhengig av landsdel. For eksempel kan man lese av verdier for et regnbed med hydraulisk konduktivitet på 2.5 cm/t og et areal på 2.5 % av nedbørsfeltet. I Trondheim vil et slikt regnbed kunne infiltrere ca 82 % av årsnedbøren og maksimalt antall timer med vannstand i regnbedet vil være ca 135 timer. Et tilsvarende regnbed i Bergen vil kun infiltrere ca 72 % av årsnedbøren og maksimalt antall timer med vannstand i regnbedet vil være ca 78 timer. Videre kan man lese av at et regnbed som skal infiltrere ca 82 % av årsnedbøren med en hydraulisk konduktivitet på 2.5 cm/t må være ca 3.3 % av nedbørsfeltet hvis det er i Bergen, mens det holder med 2.5 % i Trondheim. Setter man figur 32, 33 og 34 sammen (vedlegg C) ser man at for regnbed mindre enn 2.5 % av nedbørsfeltet og regnbed som har lavere infiltrasjonsevne enn 10 cm/t vil ytelsen være forskjellig i Bergen, Trondheim og Ås. Regnbed større enn 2.5 % av nedbørsfeltet og med infiltrasjonsevne på 10cm/t og høyere vil har ca samme ytelse (>95% av årsnedbøren).

4.4 Simulering av styrtregn

I dette kapittelet vil simuleringen av styrtregnet bli presentert. Utløpet er summen av vannmengden i drensutløpet og i overløpet for det aktuelle tidsskrittet.



Figur 35: Innløps- og utløps hydrogrammer for de 30 mest intense minuttene av nedbørshendelsen 28-29 juli 2007

Figur 35 viser hvordan stadig større volum blir fordrøyd ettersom størrelsen på regnbedet øker. Spissvannføringsreduksjonen for regnbedareal fra 0.5 til 10 % av nedbørsfeltet er henholdsvis 4, 22, 22, 69, 86 og 90 %. Fordi vann ikke går i overløp for regnbedareal fra 7 – 10 % av nedbørsfeltet, er spissvannføringsreduksjonen for disse arealene kun avhengig av arealet og infiltrasjonsevnen. For regnbedarealene hvor vann går i overløp (< 4 %), er spissvannføringsreduksjonen i tillegg avhengig av formen på nedbøren.

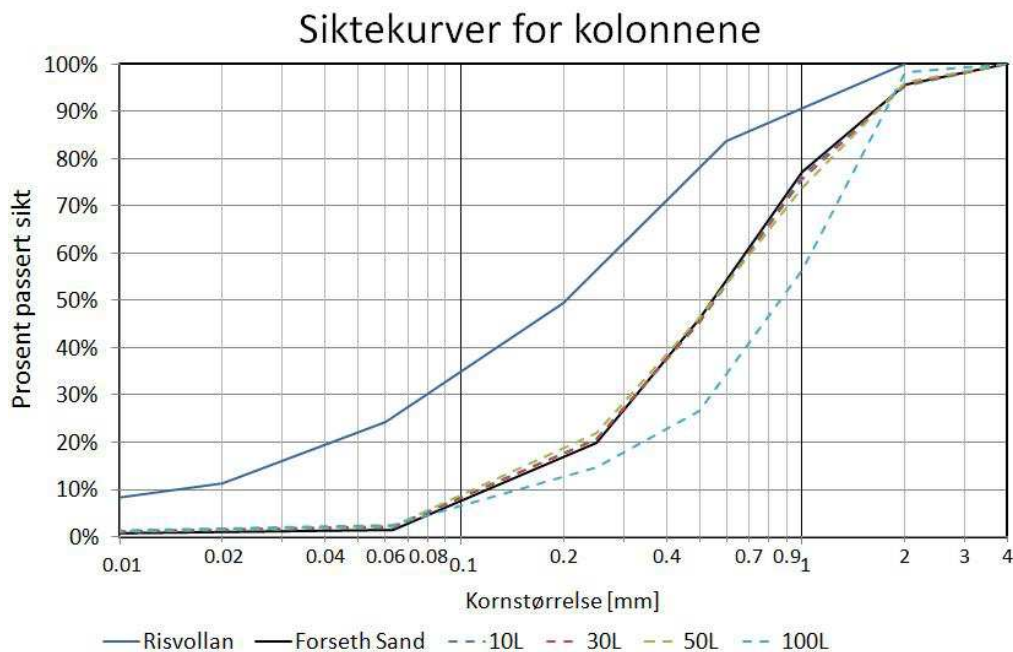
Størst reduksjon i spissvannføring får man med et regnbed på 7 % av nedbørsfeltet. Årsaken er at verken 10 % og 7 % av nedbørsfeltet gir vann i overløpet, og dermed vil den av de som har minst overflateareal gi lavest vannføring i drensøret. Årsaken til at både 2.5 % og 1.0 % regnbedstørrelse gir samme spissvannføringsreduksjon er formen på innløpshydrogrammet (figur 35). I begge tilfellene er det flomtopp nr. 2 som er bestemmende for spissvannføringsreduksjonen i regnbedet. Dermed kamoufleres også fordrøyningseffekten til det regnbedet som er 2.5 % av nedbørsfeltet når man ser på tid mellom spissvannføring inn og spissvannføring ut (15minutter for både regnbed på 1 og 2.5 %). Beregner man fordrøyningen som tid mellom sentroiden av innløpet til sentroiden av utløpet, ser man at den er tre ganger så lang for regnbedet på 2.5 % i forhold til regnbedet på 1.0 % (6 og 2 minutter). Tiden fra spissvannføring inn til spissvannføring ut for regnbedarealene 0.5, 4, 7 og 10 % av nedbørsfeltet var henholdsvis 0, 16, 97 og 38 minutter. Lang forsinkelsestid for regnbedareal fra 7 til 10 %, skyldes at regnbedene raskt oppnår maksimal infiltrasjonsrate som deretter er konstant over en lengre periode. Tiden for spissvannføringen ut er da satt til midten av perioden med konstant vannføring. Denne perioden er lengst for regnbedarealet på 7 % fordi vannføringen videreført i drensutløpet er mindre enn for regnbedarealet på 10 %.

4.5 Infiltrasjonstest i laboratoriet

Her vil resultatet fra laboratorieforsøket bli presentert. Kompostens innvirkning på infiltrasjonsevnen, temperaturens påvirkning på infiltrasjonsevne og organisk materialets påvirkning på vanninnholdet blir beskrevet.

Filtermediene

Figur 36 viser kornfordelingen til de ferdige jordblandingene. Risvolla jorden er analysert ved hjelp av pipetmetoden (Krogstad et al., 1991) ved Universitet for Miljø- og Biovitenskap. Resten av prøvene er analysert ved hjelp av sikting (SVV, 2005) ved Institutt for Vann- og miljøteknikk, NTNU. 10L betyr 10% løvkompost, 30L betyr 30% løvkompost osv.

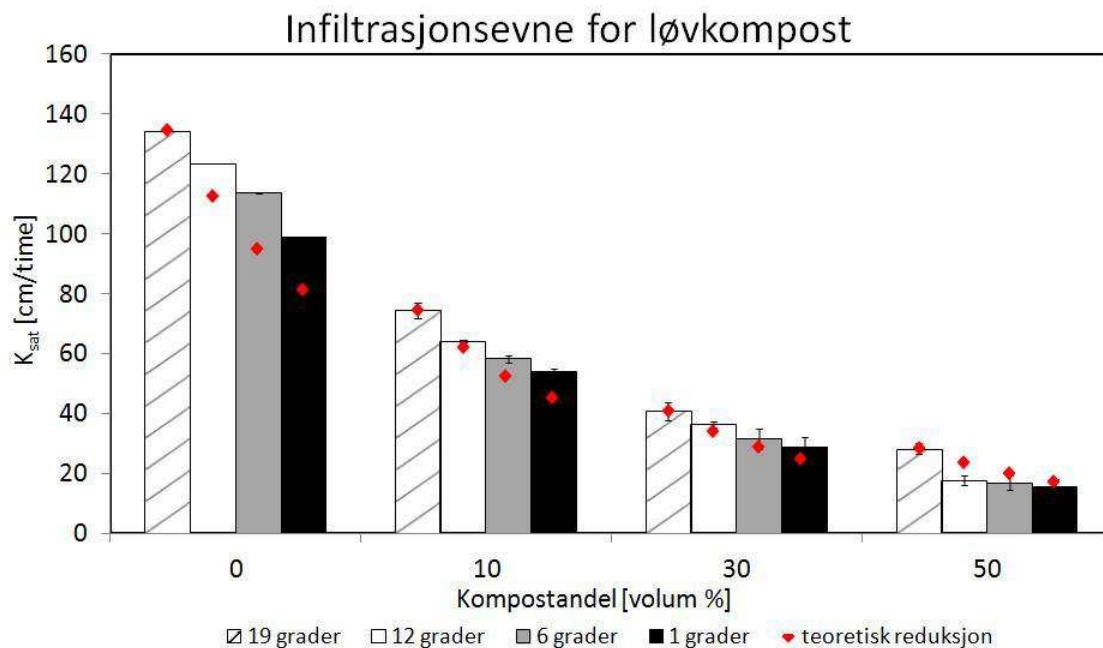


Figur 36: Siktekurver til filtermaterialene som ble testet

Risvolla jorden har ca 4.6 ganger mer finstoff ($d < 63\mu\text{m}$) enn gjennomsnittet av filtermaterialene, og er derfor forventet å ha en langt lavere hydraulisk konduktivitet. Spesifikk densitet (også kalt partikkeldensitet) til kompost er langt lavere enn spesifikk densitet til sand. Siktekurver lages basert på vektandel som passerer hver siktestørrelse. Dermed vil partikkelstørrelsen til det materialet som har størst spesifikk densitet (altså sanden) ha størst innvirkning på siktekurven. Fra siktekurvene i figur 36 ser man at kornfordelingen til jordblandingene er tilnærmet identiske. Uniformitetskoeffisienten (d_{60}/d_{10}) varierte fra 6.2 til 6.6. Alle filterprøvene klassifiseres som sand bortsett fra Risvolla prøven som klassifiseres som siltig sand (klassifisert etter Bæverfjord et al., 2011). Vekttap for sikting for Forseth Sand, 10L, 30L, 50L og 100L var henholdsvis 0.7, 1.0, 1.0, 0.8 og 1.7%.

Infiltrasjonsevnen

Figur 37 oppsummerer resultatet fra infiltrasjonsforsøket i laboratoriet.



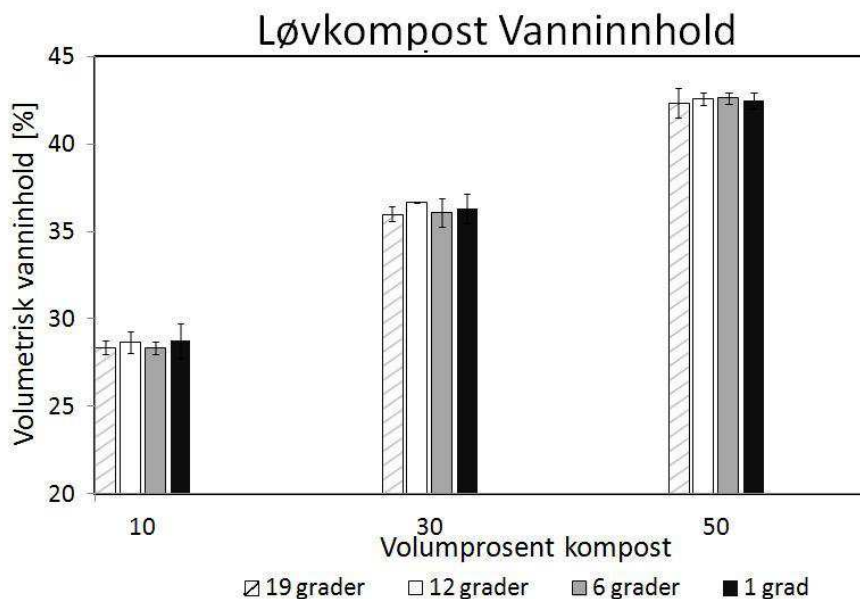
Figur 37: Infiltrasjonsevnen synker med andelen løvkompost og temperatur. Feilbarene viser standardavviket.

Figur 37 viser at hydraulisk konduktivitet synker med temperaturen, slik som forventet. Hydraulisk konduktivitet sank også med andelen kompost. Teoretisk reduksjon (rød firkanter figur 37) er beregnet ved hjelp av ligning 13 ved å bruke hydraulisk konduktivitet ved 19°C til å finne permeabiliteten. Temperaturen målt i kjølerommet varierte $\pm 2^\circ\text{C}$ i løpet av forsøkene.

Rawls et al. (1982) gir tabellverdien 21.0 cm/t hydraulisk konduktivitet for sand. Ved 19°C varierte hydraulisk konduktivitet fra 26.1 cm/t til 70.0 cm/t for filterprøvene. Noe av årsaken til en mye høyere hydraulisk konduktivitet i forsøket enn litteraturverdien skulle tilsi kan være kompakteringen. Filterprøvene ble ikke kompaktert annet enn av vekten av vannet. Pitt et al. (2008) rapporterte at infiltrasjonsevnen til sandig jord er sterkt avhengig av kompakteringsgraden. I feltforsøk hvor sandig jord hadde forskjellig kompakteringsgrad målte han en hydraulisk konduktivitet på 3.5 cm/t for kompaktert sandjord og 32.5 cm/t for ikke kompaktert sandjord. Kompakteringsgraden er ikke undersøkt her.

Vanninnhold og organisk materiale

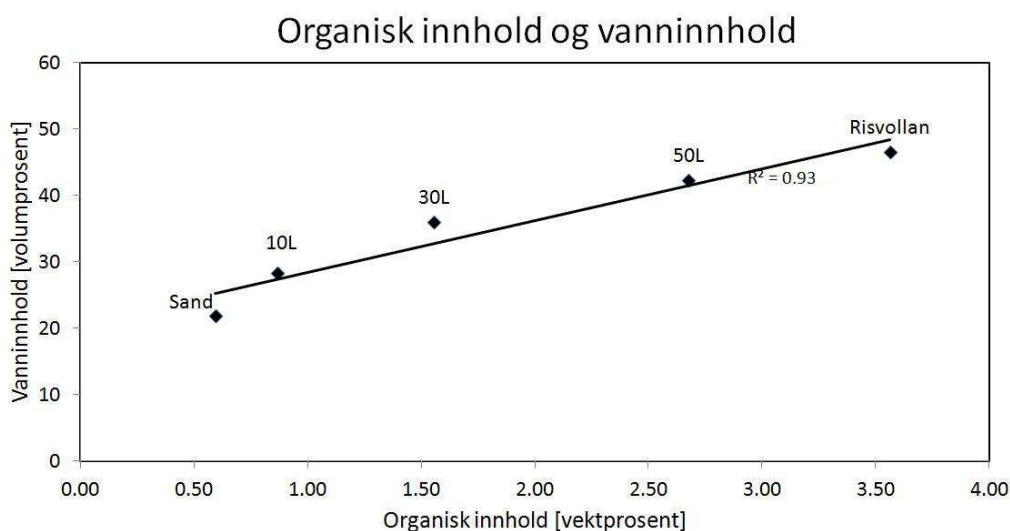
Vanninnholdet i jorden er viktig for hvilken type frost som oppstår. Både granulær, porøs og betong frost har blitt observert i regnbed (Muthanna, 2007; Davidson et al., 2008). Hvilken frost som oppstår antas å ha sammenheng med hvilket vanninnhold filtermediet har når det fryser. Figur 38 viser vanninnholdet i kolonnene før hvert forsøk.



Figur 38: Vanninnhold i kolonnene med løvkompost. . Feil-barene viser standardavviket.

Alle kolonnene har drenert 24 ± 2 timer før hvert forsøk. Dermed er det bare temperaturen og kompostandel som varierer for kolonnene. Av figur 38 ser man at temperaturen har lite å si for vanninnholdet i kolonnene, mens kompostandelen har stor betydning. Forskjellen mellom maksimalt og minimalt vanninnhold avhengig av kompostandel var 14%.

Figur 39 viser filtermaterialenes organiske innhold funnet ved hjelp av glødetapstest. Som forventet øker vanninnholdet med andelen organisk materiale.



Figur 39: Vanninnhold etter 24 timer øker med økende andel organisk materiale.

Ved å finne hvilket vanninnhold som gir betongfrost for forskjellige jordarter, kan andelen organisk materiale brukes til å justere vanninnholdet slik at betongfrost unngås. Al-Houri et al. (2009) viste at tiden (2-24timer) som jordkolonner fikk drenere

før de ble fryst påvirket infiltrasjonsevnen i fryst tilstand. Tiden som jordkolonnene måtte drenere for å ha samme infiltrasjonsevne i fryst tilstand som i ikke fryst tilstand varierte for de to jordtypene (sandig siltig leire og siltig sand, *eng: sandy loam og sand*) som ble undersøkt. For regnbed i kaldt klima er dette en viktig parameter som bør undersøkes ytterligere.

Infiltrasjon i Risvollan regnbed

Laboratorieforsøket er gjennomsnittet fra alle forsøkene (temperatur 0-19°C). Risvollan sanden klassifiseres som siltig sand (*eng. loamy sand*), som etter Rawls et al. (1982) har en hydraulisk konduktivitet på 6.1cm/t. Tabell 10 viser sammenligningen av vannmettet hydraulisk konduktivitet på Risvollan funnet ved forskjellige metoder.

Tabell 10: Sammenligning av vannmettet hydraulisk konduktivitet (cm/t)

	Geometrisk middel fra MPD (aug-nov)	RECARGA (aug-nov)	Laboratorieforsøk
Gjennomsnitt	1.4	1.4	2.0
Standardavvik	7.9	-	0.3

Alle metodene gir ca samme svar. Geometrisk middel har naturlig stort standardavvik fordi variasjonen i infiltrasjonsevnen på overflaten i regnbedet varierer veldig. RECARGA er kalibrert for en lang tidsserie og har derfor ikke standardavvik. Laboratorieforsøket viser klart høyest infiltrasjonsevne. Dette er forventet fordi jorden er tatt ut av regnbedet og dermed blitt omrørt (ikke in-situ kompaktert). Årsaken til at Risvollan regnbed har lavere infiltrasjonsevne enn det tabellverdien fra Rawls et al. (1982) skulle tilsi, kan altså være kompakteringsgraden.

5 Vurderinger og diskusjon

I dette kapittelet blir vurderinger og diskusjoner rundt resultatene som helhet presentert.

5.1 Sammenligning av vannmettet hydraulisk konduktivitet fra RECARGA mot MPD-forsøk

Vannmettet hydraulisk konduktivitet varierte mye på overflaten i regnbedet (0-35cm/time høsten 2011, 0-15cm/time mai 2012, målt med MPD). Dette er vanlig i regnbed. Årsaken er blant annet sedimenter i vannet som tetter overflaten, ulike planters rotvekst, biologisk aktivitet og ulik kompaktering. Ahmed (2011) erfarte det samme da hun så på resultatet fra MPD-forsøk i seks regnbed i Minnesota, og stilte spørsmålet: Er aritmetisk eller geometrisk gjennomsnitt av vannmettet hydraulisk konduktivitet mest representativt for regnbed når det gjelder dimensjonering? Tabell 11 sammenligner vannmettet hydraulisk konduktivitet funnet ved MPD forsøk og funnet ved kalibrering i RECARGA. For august, september og oktober ble det benyttet henholdsvis 10, 7 og 29 MPD'er.

Tabell 11: Gjennomsnittlig vannmettet hydraulisk konduktivitet [cm/time] funnet ved MPD og RECARGA

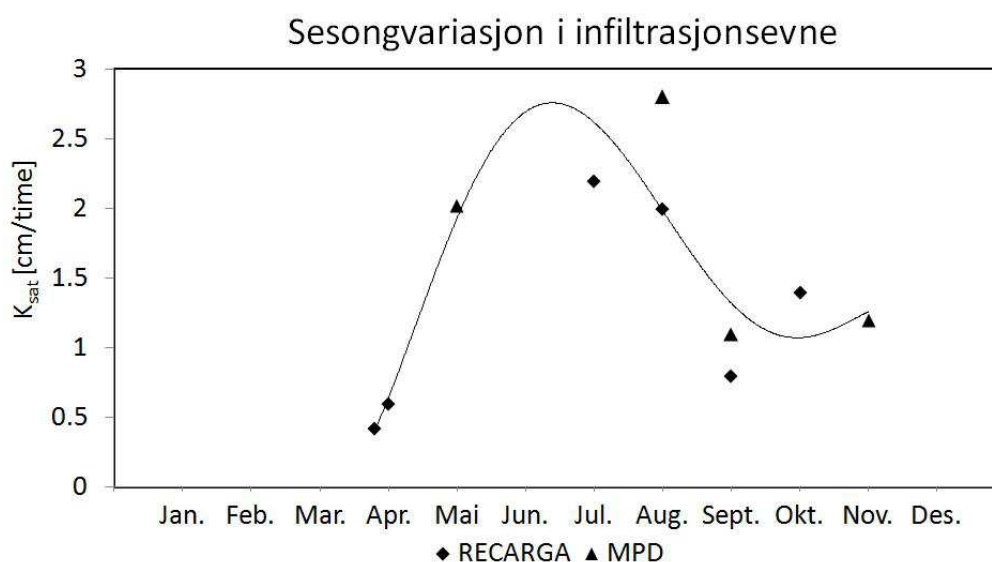
Måned	Aritmetisk middel fra MPD	Geometrisk middel fra MPD	Median fra MPD	Optimalisert med RECARGA
Aug.	5.9	2.8	5.26	2.0
Sept.	1.4	1.1	1.0	0.8
Okt. ^/Nov*.	4.9*	1.2*	2.1*	1.4^
Alle målinger	4.6	1.4	2.3	1.4

Av tabell 11 ser man at aritmetisk midlet konduktivitet overestimerer i forhold til RECARGA, og at geometrisk middel gir et bedre estimat. Det geometriske middelet for alle månedene er faktisk helt likt det som er funnet ved hjelp av RECARGA. Medianen overestimerer også, men ikke like mye som aritmetisk middel. Hydraulisk konduktivitet funnet ved hjelp av RECARGA er den som best passer de målte vannføringerne (og dermed passer best med den faktiske hydrologiske ytelsen), og dermed indikerer tabell 11 at geometrisk midlet konduktivitet funnet ved infiltrasjonstester bør brukes til å evaluere regnbeds ytelse. Årsaken til at geometrisk midlet konduktivitet gir best estimat er i følge Ahmed (2012) at infiltrasjonsevnen er log-normalt fordelt på overflaten i regnbed. MPD-testene fra Risvollan regnbed var også log-normalt fordelt.

Modified Phillip-Dunne infiltrometer (MPD) måler vannmettet hydraulisk konduktivitet på overflaten (øverste 30 cm, (Gulliver et al., 2010)) i regnbedet, mens vannmettet hydraulisk konduktivitet funnet ved hjelp av RECARGA gir verdien for det jordlaget med lavest infiltrasjonsevne. En høyere infiltrasjonsevne målt med MPD-forsøk enn den som er funnet ved hjelp av RECARGA indikerer at det øverste laget i Risvollan regnbed ikke er det begrensende laget for infiltrasjon.

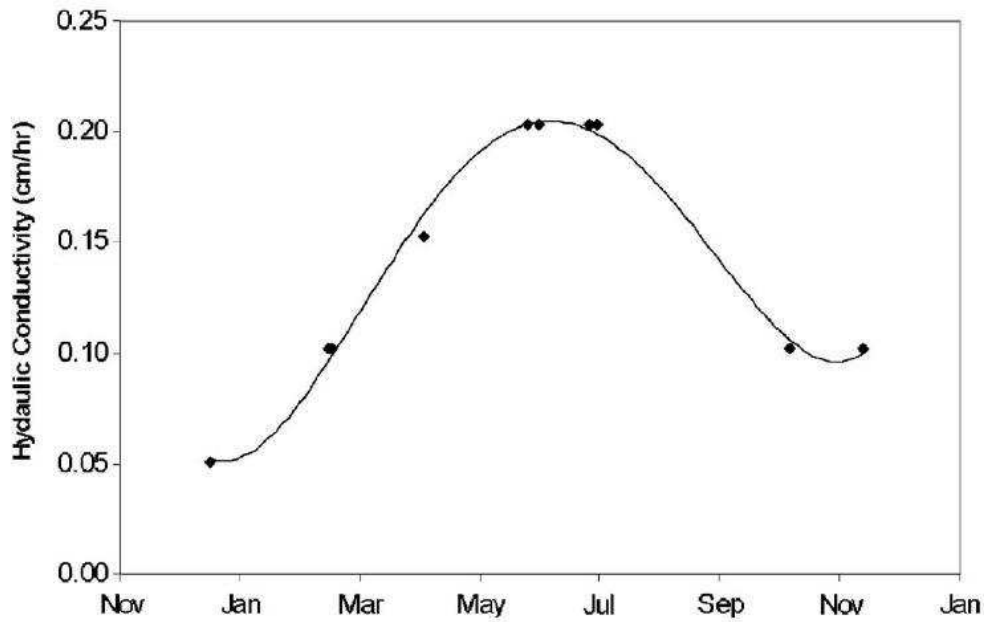
5.2 Variasjon i infiltrasjon gjennom året

Figur 40 viser infiltrasjonsevnen i Risvollan regnbed gjennom året.³ Vannmettet hydraulisk konduktivitet varierer fra 0.4 til 2.8 cm/time. Som forventet er infiltrasjonen høyest i de varmeste månedene. Dette samsvarer med hva som er funnet tidligere (figur 40, Braga et al., 2007). En videre oppfølging av Risvollan regnbed vil avdekke om infiltrasjonen kan øke med tiden grunnet plantenes rotvekst, eller om den synker som følge av gjentetting av filtermediet. Måling av infiltrasjonsevne i de kaldeste månedene (desember til februar) vil også avdekke hva som er den minste vannmettete hydrauliske konduktiviteten i løpet av året. Dette er imidlertid vanskelig å måle fordi frost og snø vanskeliggjør infiltrasjonsmålinger på overflaten og kontinuerlige målinger med V-overløp (se figurer kap 4.1).



Figur 40: Sesongvariasjon i infiltrasjonsevne i Risvollan regnbed, basert på RECARGA kalibrering og MPD-forsøk

³Det ble benyttet 19 MPD'er under feltforsøket 22. mai, figur 40



Figur 41: Variasjon i infiltrasjonsevne gjennom året(Braga et al., 2007)

Braga et al. (2007) gjorde en lignende studie i Philadelphia, USA, hvor en modell basert på Green-Ampts ligning ble kalibrert mot målinger av vannstanden i et siltig sandfilter ved å endre vannmettet hydraulisk konduktivitet i modellen.

Variasjonen i vannmettet hydraulisk konduktivitet i løpet av året er ikke tatt hensyn til i simuleringen av smelte- og nedbørsdata fra Bergen, Trondheim og Ås. Et klart forbedringspotensial i estimeringen av årlig vannmengde infiltrert ligger i å programmere inn vannmettet hydraulisk konduktivitet som funksjon av temperatur i RECARGA.

5.3 Vurdering av dimensjoneringskriterier

Av arbeidet i denne oppgaven ser man at en rekke parametere er viktig for ytelsen. På bakgrunn av dette er tabell 12 laget.

Tabell 12: Parametere i dimensjoneringsmetoder, X=parameteren inngår i metoden

Metode	Vann- mengde som skal håndteres	Infiltrasjons- evne	Drenerings- tid	Regnbedets maksimale vannstand	Filter- mediets dybde	Tid mellom nedbørs- hendelse	Formen på di- mensjo- nerende regn
Rasjonale metode	-	-	-	-	-	-	-
TPGC	X	X	X	X	X	-	-
New York	X	-	-	X	X	-	-
New York kaldt klima	X	-	-	X	X	-	-
SCS metoden	X	-	-	X	-	-	-
Wisconsin homeowner	-	X	-	-	X	-	-
Spildevands- komiteen	X	X	X	X	-	-	-

I tillegg til paramterne presentert i tabell 12 har de fleste metodene en manual med anbefalinger for maksimal vannstand, dybde på filtermediet, dreneringstid osv., slik som presentert i kapittel 2.

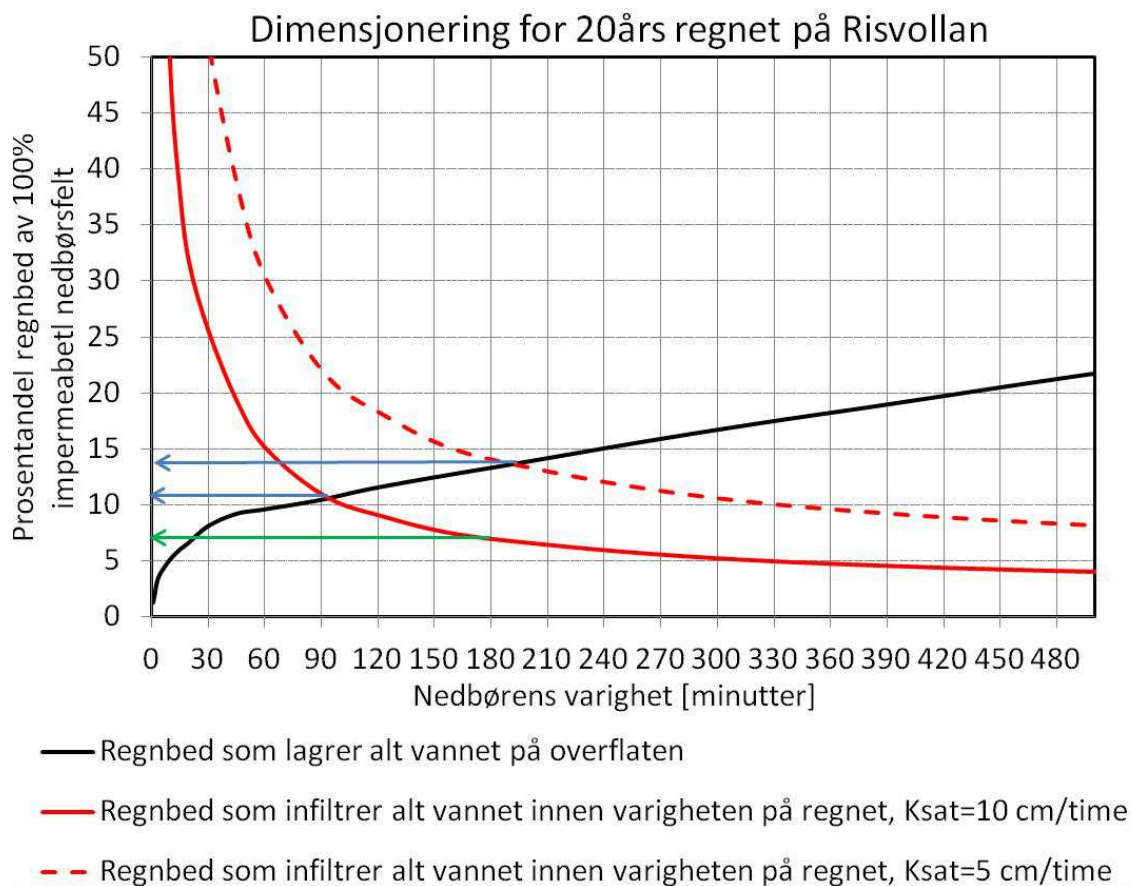
Av tabell 12 ser man at ingen av metodene tar hensyn til tid mellom nedbørshendelsene og formen på dimensjonerende regn.

New York metodene og SCS metoden tar ikke hensyn til infiltrasjonsevnen i regnbedet, og blir dermed unødvendig konservativ fordi alt vannet skal kunne lagres i regnbedet. Dreneringstiden blir da heller ikke tatt hensyn til. New York kaldt klima metoden er den eneste som tar hensyn til smeltevannsmengde, dog på en noe forenklet måte. Blant annet ved å dele vannvolumet som må håndteres på to fordi snøsmelting er en langsommere prosess en avrenning fra nedbør.

TPGC- og Spildevandskomitemetoden mangler tiden mellom nedbørshendelser og formen på dimensjonerende regn i metoden. Som de fleste andre metoder er TPGC- og Spildevandskomitemetoden sterkt avhengig av vannmengden som skal håndteres. I Spildevandskomiteemetoden beregnes vannvolumet basert på danske nedbørsdata. I amerikanske veiledninger beregnes vannmengden ved hjelp av den amerikanske veiledningen i urbanhydrologiske beregninger TR-55 (USDA, 1986). Et alternativ er å beregne vannmengdene ved hjelp av IVF-kurver. Dimensjonerer man for et tre timer langt 15 års regn, slik som simulert i figur 35, får man en vannmengde på 257 m^3 for 1.0 ha impermeable flater (avrenningskoeffisient lik 1). Antar man en infiltrasjonsevne på 10 cm/t, maksimalvannstand i regnbedet på 20.0 cm, filterdybde på 0.75 m og en dreneringstid på 1 døgn, får man et regnbedareal tilsvarende 0.85 % av nedbørsfeltet dimensjonert etter TPGC metoden. Av figur 35 ser man at spissvannføringsreduksjonen er mellom 4 og 22 %. TPGC (2007) manualen har i tillegg et krav om at 75 % av dimensjonerende vannvolum skal kunne lagres i overvannsystemet før infiltrering. Dette kan løses ved andre såkalte grønne tiltak slik som swales og grønne tak. Skulle 75 % av volumet på 257 m^3 håndteres kun ved hjelp av regnbed med 20 cm dybde måtte det utgjort 12.9 % av nedbørsfeltet. Med så stort regnbed ser vi av figur 35 at spissvannføringsreduksjonen ville blitt ca 90 %.

Alternativt kunne man satt dreneringstiden til 3 timer (0.125 døgn, varigheten på nedbøren), slik at vannmengden ikke må lagres i nedbørsfeltet (som er tilfellet når dreneringstiden er 1 døgn). Med resten av forutsetningene like, ville da regnbedet måttet være 6.8 % av nedbørsfeltet, og spissvannføringsreduksjonen ville fortsatt vært ca 90 % for tre timers 15års regnet.

For korte regn (20 min) ville regnbedet blitt veldig stort hvis dreneringstiden settes lik varigheten på regnet, fordi regnbedet har en begrenset infiltrasjonsevne. Regnbed som dimensjoneres for å lagre alt vannet på overflaten ville blitt mindre for så korte regn. For lengre regn (2 timer) blir regnbed unødvendig store hvis de dimensjoneres for å lagre alt vannet på overflaten, fordi infiltrasjonen ikke tas hensyn til. Utfordringen er altså og både ta hensyn til dreneringstiden/regnets varighet, infiltrasjonsevne og vannvolumet som skal håndteres. Figur 42 prøver å løse dette basert på TPGC metoden og IVF kurver. Figuren tar utgangspunkt i nedbør med 20 års gjentakintervall på Risvollan. Her er svart linje nødvendig areal for å lagre alt vannet på overflaten i regnbedet (20 cm maksimal vannstand). Dette arealet øker i takt med lengden på nedbørsvarigheten fordi nedbørsmengden øker med varigheten. Røde linjer er regnbedets areal hvis alt vannet skal infiltreres innen regnets varighet (dreneringstid settes lik regnets varighet i TPGC-metoden) uten å ta hensyn til at vann kan lagres på overflaten og infiltreres etter nedbørhendelsen.



Figur 42: Dimensjonering av regnbed for håndtering av større nedbørshendelser

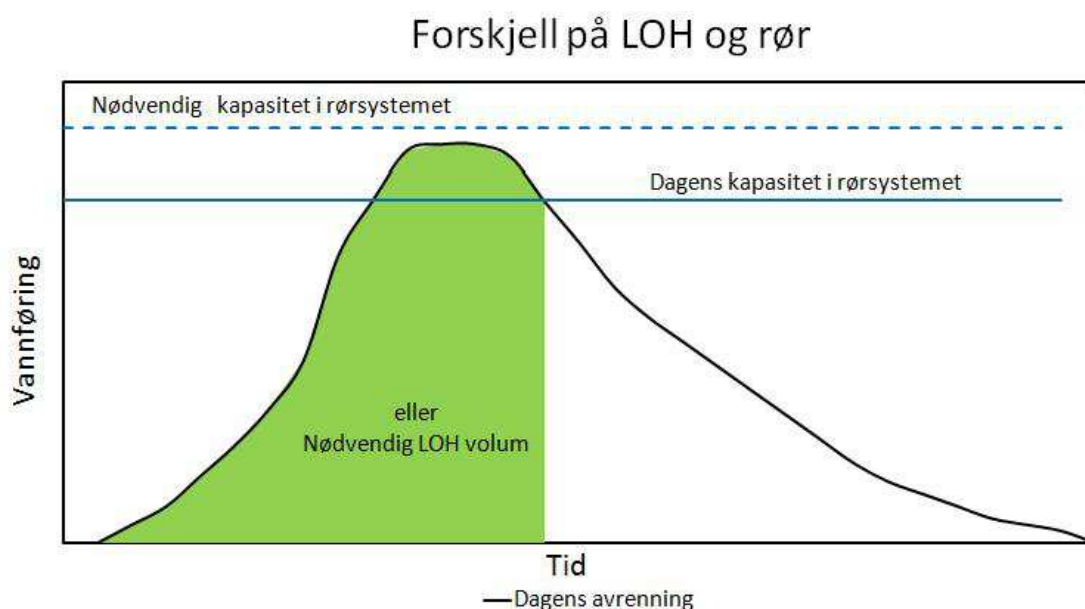
Krysningspunktet mellom grafene for de to metodene i figur 42 gir altså dimensjonerende regnbedareal, fordi nedbør med lengre varighet gir regnbedet nok tid til å infiltrere vekk vannet og kortere varighet gir mindre nedbør enn regnbedet kan lagre. Denne metoden finner altså krysningspunktet hvor valg av dimensjoneringsmetode skjer. Vannmengde infiltrert og lagringsvolum tilgjengelig tas derfor ikke hensyn til samtidig, noe som gjør at metoden er konservativ. Hvilken tilstand regnbedet er i ved starten på den dimensjonerende nedbøren (tid mellom nedbørshendelser) er ikke tatt hensyn til. Infiltrasjonen vil heller ikke være konstant gjennom hele nedbørstilfellet (slik som den rød linjen antar) og vannmengden inn i regnbedet i starten på nedbørstilfellet kan være for liten til at regnbedet oppnår maks infiltrasjon fra første minutt. At metoden er konservativ kan veie opp for dette. Styrtregnet som ble simulert i kapittel 4.4 var et tre timers 15 års regn. Figur 42 kan brukes til å dimensjonere spesifikt for et tre timers 20 års regn (ca 1 mm mer enn 15 års regnet). Av figuren ser vi (hel grønn strek) at ett tre timers 20 års regn (180 min) vil kreve ca 7 % regnbed areal, tilsvarende det som ble funnet ved simulering.

Videre ser man at for å håndtere langvarig regn kreves det mindre areal. Regnbed som skal håndtere nedbør lengre enn 330 minutter må bare være 5 % av nedbørsfeltet (Hel rød strek, Ksat=10 cm/t). Fordi intensiteten ved så langvarig regn er lavere, klarer regnbedet å holde unna vannmengdene. Korte regn gir kanskje lokale oversvømmelse fordi ledningsnettets ikke har kapasitet, mens den langvarige nedbøren kan skape store oversvømmelser. Regnbed er i så måte et godt tiltak.

Ingen av dimensjoneringsmetodene tar hensyn til formen på innløpshydrogrammet til regnbedet. Eneste alternativet er å dimensjonere regnbedet så stort at vann ikke går i overløp eller å simulere dimensjonerende nedbørshendelse ved hjelp av program som RECARGA.

5.4 Valg av strategi for implementering av regnbed som flomreduserende tiltak

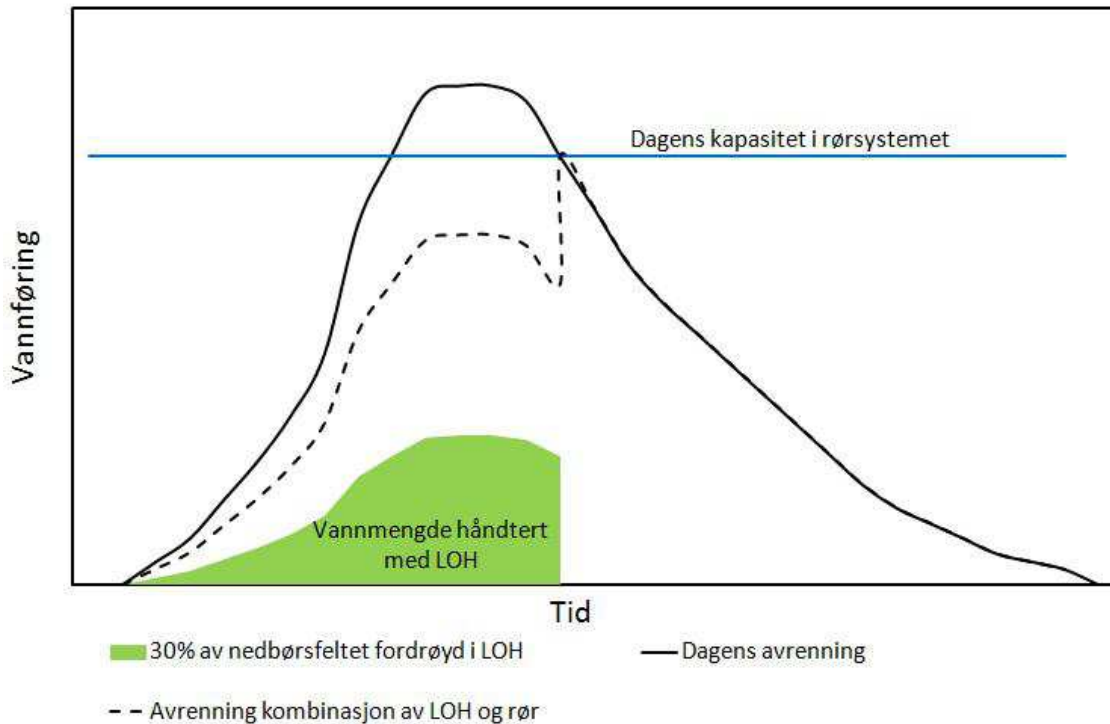
Lokal overvannshåndtering innebærer en annen strategi for overvannshåndtering enn konvensjonelt system. Av tabell 12 ser man at vannvolumet som skal håndteres er gjenganger i dimensjoneringsmetodene for regnbed. For rør er det nedbørsintensiteten som skal håndteres som er dimensjonerende. Figur 43 viser prinsipiell forskjell mellom implementering av lokal overvannshåndtering i områder med eksisterende rørsystem og fortsatt bruk av rør.



Figur 43: Prinsipiell forskjell mellom konvensjonell overvannshåndtering og LOH, (laget etter Aabling et al., 2011)

Spissvannføringsreduksjon i lokal overvannshåndtering innebærer å fordrøye overvannsvolumet tilstrekkelig i nedbørsfeltet slik at flomtoppen reduseres til et nivå det eksisterende rørsystemet kan håndtere (figur 43). Som indikert i figur 43 og vist i simuleringen av styrtregn (figur 35) vil et regnbed ikke gi noen spissvannføringsreduksjon når fordrøyningsvolumet er fylt opp. Derfor vil vannføringen ut av nedbørsfeltet øke betydelig i det fordrøyningsvolumet er fullt. Underdimensjonering av regnbed vil derfor kunne gi null spissvannføringsreduksjon. En sikrere strategi er å utnytte eksisterende rørsystem parallelt med utnyttelsen av regnbedets fordrøyningsvolum. Figur 44 viser prinsippet.

Samspill mellom LOH og rør



Figur 44: Prinsipp for kombinasjon av LOH og konvensjonelt rørsystem. Når fordrøyningsvolumet er fullt øker vannføringen ut av nedbørsfeltet raskt til det den avrenningen nedbørsfeltet ville hatt uten LOH-tiltak.

Ved å la deler av nedbørsfeltet bli håndtert ved hjelp av regnbed utnyttes rørsystemet underveis i nedbørshendelsen (stiplet linje). Dermed er behovet for fordrøyningsvolum mindre. Dette kan gjøres ved å kun la tette flater gi avrenning til regnbedet eller plassere regnbedet lenger oppstrøms i nedbørsfeltet. Det gjør det lettere å overdimensjonere tiltak slik som regnbed. Som vist i figur 44 vil da et mindre regnbed kunne føre til den samme spissvannføringsreduksjonen som et større regnbed som tar imot vann fra hele nedbørsfeltet (vist i figur 43).

6 Konklusjon

RECARGA har vist seg egnet til å estimere vannmengder i overløp og infiltrert ved simuleringer på timesbasis. Noe varierende Nash-Sutcliffe koeffisienter for utløpshydrogrammene skyldes delvis forenklingene i RECARGA og delvis vanskeligheter med vannføringsmålinger. For simuleringer på minuttbasis har RECARGA vist godt samsvar med målte utløpshydrografer. Det konkluderes derfor med at estimering av utløpshydrografer for nedbørshendelser på minuttbasis kan gjøres med RECARGA.

Infiltrasjonsforsøk i felt har vist godt samsvar med simuleringer i RECARGA. Feltmålinger har stort standardavvik fordi infiltrasjonsevne på overflaten i regnbed varierer mye (Risvolla regnbed varierte fra 0 til 35 cm/t). Det geometriske midlede gjennomsnittet fra infiltrasjonsforsøkene gir et bedre estimat på infiltrasjonsevnen i Risvolla regnbed enn det aritmetiske middelet. Årsaken er antakeligvis fordelingen (log-normalt) av infiltrasjonshastigheter i regnbedet. Infiltrasjonstester av allerede anlagte regnbed kan dermed brukes til å beregne ytelsen til regnbed eller avdekke områder i regnbedet som bør rehabiliteres.

Overvåking av Risvolla regnbed har vist stor variasjon i vannmettet hydraulisk konduktivitet i løpet av året (0.4-2.8 cm/time). Sesongvariasjoner i infiltrasjonsevne og regnbeds ytelse har blitt dokumentert flere steder (Braga et al., 2007; Muthanna, 2007). I estimeringen av prosentandel av årsnedbøren infiltrert er det antatt en konstant vannmettet hydraulisk konduktivitet gjennom året. Ved å velge den lavest hydrauliske konduktiviteten regnbed har i løpet av året og lese av grafene for årlig vannmengde infiltrert, vil dette da gi et konservativt estimat på årlig vannmengde infiltrert.

Infiltrasjonsforsøk i laboratoriet har vist at større andel løvkompost i jorden senker infiltrasjonsevnen og øker vanninnholdet. Andelen løvkompost i filtermediet bør derfor bestemmes ut fra ønsket mengde organisk materiale til renseformål og ønsket infiltrasjonsevne.

I oppgaven har det blitt vist to forskjellige måter å tilnærme seg bruken av regnbed. Den første går på å bestemme nødvendig regnbedareal og infiltrasjonsevne for å infiltrere en bestemt andel av årsnedbøren. Det er vist at for regnbed med en vannmettet hydraulisk konduktivitet på 10 cm/t og et areal på 2.5 % av nedbørsfeltet vil kunne infiltrere over 95 % av årsnedbøren både i Bergen, Trondheim og Ås. Dette gir gode muligheter for å avlaste nedstrøms renseanlegg og senke overløpsutslippene der hvor både spillvann og overvann renner i samme rør. For slik dimensjonering anbefaler jeg bruk av grafer slik om figur 32, 33 og 34, fordi disse tar hensyn til virkelig nedbørsdata. Dermed tas det hensyn til tid mellom nedbørshendelser og formen på nedbør. I tillegg får man informasjon om antall sammenhengende timer med vannstand i regnbedet.

Den andre tilnærmingen går på nødvendig areal for å redusere spissvannføringen fra større nedbørshendelser. Det har blitt vist at dette krever større regnbedareal enn for å infiltrere årsnedbøren. Regnbedareal på 7 % og større vil kunne redusere spissvannføringen fra et tre timers 15års regn på Risvolla med ca 90 %. For regnbed

der vann går i overløp i løpet av nedbørshendelsen blir spissvannføringen bestemt av formen på nedbørshendelsen. Dermed er bestemmelsen av spissvannføringsreduksjonen vanskelig uten å simulere nedbørshendelsen i program som RECARGA. Hvilket vannvolum som må håndteres er en viktig parameter som må bestemmes. Jeg anbefaler å bruke IVF-kurvene til å finne nødvendig vannvolum. Deretter må det bestemmes om vannvolumet skal håndteres av regnbedet alene eller i samvirke med andre LOH-tiltak. TPGC-formelen kan brukes til å finne nødvendig regnbedareal for å infiltrere vannvolumet innen dreneringstiden. Man må imidlertid være oppmerksom på at dette kan gi et for lite regnbed hvis dreneringstiden settes til en eller to dager. Det må derfor tas hensyn til at vannvolumet må lagres et sted i nedbørsfeltet eller i regnbedet.

7 Forslag til videre arbeid

For å danne et bedre dimensjoneringsgrunnlag for regnbed i kaldt klima foreslår jeg følgende arbeid:

1. Forsette overvåkningen av Risvolla regnbed slik at endringer i infiltrasjonsevne over tid kan evalueres. Spesielt fokus på når og eventuelt i hvilken grad betongfrost oppstår.
2. Utføre infiltrasjonsforsøk med frosset filtermedie i laboratoriet. Spesielt bør påvirkning fra organisk materiale på infiltrasjonsevnen i frosset tilstand undersøkes.
3. Programmere inn variasjon i vannmettet hydraulisk konduktivitet i RECARGA. Dette vil estimere årlig vannmengde infiltrert mer nøyaktig. Noe av utfordringen her er å finne en god korrelasjon mellom temperatur, tid mellom nedbørshendelser og vanninnhold som kan brukes til å estimere sesongvariasjoner i vannmettet hydraulisk konduktivitet.
4. Kompaktering av filtermediet bør undersøkes nærmere. Er kompakteringen avhengig av mengde organisk innhold? Kan man forvente at filtermediet kompakteres over tid?
5. Metode for å simulere forskjellige typer LOH-tiltak i urbane nedbørsfelt. På den måten kan den samlede effekten av tiltak som swales, regnbed, grønne tak, impermeabel asfalt, etc, kvantifiseres i en modell.
6. Livssyklus kostnader for regnbed bør beregnes slik at kostnaden kan sammenlignes med konvensjonelt system.

Litteraturliste

- Aabling, T., S. Gabriel, and K. Arnbjerg-Nielsen: 2011, 'Dimensionering av LAR-anlegg'. Technical report, Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark.
- Ahmed, F.: 2011, 'Spatial Variation of Infiltration in LID practices'. University of Minnesota, Stormwater Research at St. Anthony Falls Laboratory. <http://stormwater.saf.umn.edu/updates-february-2011>. USA.
- Ahmed, F.: 2012, 'Personlig kommunikasjon, epost'. Graduate Research Assistant. St. Anthony Falls Laboratory. PhD Candidate. University of Minnesota, USA.
- Al-Houri, Z., M. Barber, D. Yonge, J. Ullman, and M. Beutel: 2009, 'Impacts of frozen soils on the performance of infiltration treatment facilities'. *Cold Regions Science and Technology* **59**(1), 51 – 57.
- Asleson, B. C., R. S. Nestingen, J. S. Gulliver, R. M. Hozalski, and J. L. Nieber: 2009, 'Performance Assessment of Rain Gardens'. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **45**(4), 1019–1031.
- Atchison, D., K. Potter, and L. Severson: 2006, 'Design Guidelines for Stormwater Bioretention Facilities'. University of Wisconsin - Water Resources Institute. Publication No. WIS-WRI-06-01.
- Atchison, D. and L. Severson: 2004, 'Recarga User's Manual'. University of Wisconsin Madison, Civil and Environmental Engineering Department, Water Resources Group, 2.3 edition.
- Bæverfjord, M., T. Døssland, A. Eknes, K. Hagberg, A. Handberg, J. Jønland, Ø. Nerland, O. E. Rundmo, R. Sandven, and T. E. Frydenlund: 2011, 'Veiledning for symboler og definisjoner i geoteknikk, Identifisering og klassifisering av jord'. Technical report, Norsk Geoteknisk Forening.
- Braenden, M.: 2011, 'Removal of PCBs and Particulates in Stormwater Using Bioretention'. Master's thesis, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet.
- Braga, A., M. Horst, and R. G. Traver: 2007, 'Temperature Effects on the Infiltration Rate through an Infiltration Basin BMP'. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **133**(6), 593–601.
- Caraco, D. and R. Claytor: 1997, 'Stormwater BMP Design Supplement for Cold Climates'. Technical report, Center for Watershed Protection. Elliot City, Maryland.
- Claytor, R. A. and T. R. Schueler: 1996, 'Design of Stormwater Filtering Systems'. Technical report, The Center for Watershed Protection. Elliot City, USA.
- Davidson, J. D., N.-J. LeFevre, and G. Oberts: 2008, 'Hydrologic Bioretention Performance and Design Criteria for Cold Climates'. Technical report, Dakota Country Soil and Water Conservation District, Emmons & Olivier Resources, Inc. WERF Project 04-DEC-13SG.

- Davis, A. P., W. F. Hunt, R. G. Traver, and M. Clar: 2009, 'Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs'. *Journal of Environmental Engineering* **135**(3), 109–117.
- DEC: 2012, 'Groundbreaking Agreement Will Use Green Infrastructure to Improve Water Quality in New York Harbor'. Department of Environmental Conservation, web: <http://www.dec.ny.gov/press/80919.html>.
- Dingman, S. L.: 2002, *Physical Hydrology*. University of New Hampshire: Waveland Press, Inc.
- Dussaillant, A.: 2012, 'University of Greenwich, Personlig kommunikasjon: epost mars 2012'.
- Dussaillant, A., K. Cozzetto, K. Brander, and K. Potter: 2003, 'Green-Ampt model of a rain garden and comparison to Richards equation model'. *Sustainable planning and development, the sustainable world* **6**, 891–900.
- Dussaillant, A. R., A. Cuevas, and K. W. Potter: 2005, 'Raingardens for stormwater infiltration and focused groundwater recharge simulations for different world climates'. *Water Supply* **5**(3-4), 173–179.
- eKlima: 2012, 'Meteorologisk Institutt's klimadatabase'. www.eklima.no.
- Erickson, A. J., J. S. Gulliver, J.-H. Kang, P. T. Weiss, and C. B. Wilson: 2010, 'Maintenance for Stormwater Treatment Practices'. *Journal of Contemporary Water Research & Education* **146**(1), 75–82.
- Green, W. H. and G. A. Ampt: 1911, 'Studies on Soil Physics, 1. The flow of air and water through soils.'. *Journal of Agricultural Science* **4**, 1–24.
- Gulliver, J., A. Erickson, and P. Weiss: 2010, 'Stormwater Treatment Assessment and Maintenance'. University of Minnesota, St. Anthony Falls Laboratory. Minneapolis, MN. tilgjengelig fra <http://stormwaterbook.safll.umn.edu/content/infiltration>.
- Hall, M. J.: 1984, *Urban Hydrology*. Elsevier Applied Science Publishers. London, U.K.
- Harmel, R. D. and P. K. Smith: 2007, 'Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling'. *Journal of Hydrology* **337**, 326 – 336.
- Hinman, C.: 2005, 'Low Impact Development - Technical Guidance Manual for Puget Sound'. Puget Sound Action Team - Washington State University Pierce County Extension. Pub. No. PSAT 05-03.
- Hunt, W. F. and W. G. Lord: 2006, 'Bioretention performance, design, construction and maintenance'. *North Carolina Cooperative Extension Service, Raleigh, N.C.*
- Hunt, W. F. and N. White: 2001, 'Urban Waterways, designing rain garden (Bioretention Areas)'. Technical report, North Carolina Cooperative Extension Service. Raleigh-NC (report nr. AG-588-3).

- Kihlgren, K. and V. Saksæther: 2012, 'Regnbed som tiltak for overvannshandtering i smahusbebyggelse'. Master's thesis, Universitetet for Miljø og Bioteknologi.
- Krogstad, T., P. Jørgensen, T. Sogn, T. Børresen, and A. G. Kolnes: 1991, 'Manual for kornfordelingsanalyse etter pipettemetoden, Rapport nr. 6/91'. Institutt for jordfag, Universitetet for Miljø og Bioteknologi-NLH.
- Lee, R. S.: 2011, 'Modeling Infiltration In a Stormwater Control Measure using Modified Green and Ampt'. Master's thesis, The Faculty of the Department of Civil and Environmental Engineering, Villanova University.
- LeFevre, N. J., J. D. Davidson, and G. L. Oberts: 2009, 'Bioretention of Simulated Snowmelt: Cold Climate Performance and Design Criteria'. Vol. 359. pp. 17–17, ASCE.
- Li, H. and A. P. Davis: 2008a, 'Urban Particle Capture in Bioretention Media. I: Laboratory and Field Studies'. *Journal of Environmental Engineering* **134**(6), 409–418.
- Li, H. and A. P. Davis: 2008b, 'Urban Particle Capture in Bioretention Media. II: Theory and Model Development'. *Journal of Environmental Engineering* **134**(6), 419–432.
- Lindholm, O., S. Endresen, S. Thorolfsson, S. Saegrov, G. Jakobsen, and L. Aaby: 2008, 'Veiledning til klimatilpasset overvannshandtering'. *Norsk Vann rapport* **162**.
- Lohman, S. W., United States, Committee, on, Redefinition, of, Ground-Water, and Terms: 1972, *Definitions of selected ground-water terms—revisions and conceptual refinements*. Washington: U.S. Govt. Print. Off.
- Marsalek, J.: 2003, 'Road salts in urban stormwater, an emerging issue in stormwater management in cold climates'. *Water Science and Technology* **48**(9), 61–70.
- Marsalek, J., G. Oberts, K. Exall, and M. Viklander: 2003, 'Review of operation of urban drainage systems in cold weather: water quality considerations'. *Water Science & Technology* **48**(9), 11–20.
- McKnight, T. and D. Hess: 2005, *Climate Zones and Types, The Koppen System, Physical geography A Landscape Appreciation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mein, R. and C. Larson: 1973, 'Modeling Infiltration during a Steady Rain'. *Water Resources Research* **9**, 384–394.
- Munoz-Carpena, R., C. M. Regalado, J. Alvarez-Benedi, and F. Bartoli: 2002, 'Fieldevaluation of the new Philip-Dunne permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity'. *Soil Science* **167**, 9–24.
- Muthanna, T. M.: 2007, 'Bioretention as a Sustainable Stormwater Management Option in Cold Climates'. Ph.D. thesis, Norges Teknisk-naturvitenskapelig Universitet.

- Nachabe, M. H.: 1998, *Refining the Definition of Field Capacity in the Literature*, Vol. 124. ASCE.
- Nash, J. and J. Sutcliffe: 1970, 'River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles'. *Journal of Hydrology* **10**(3), 282 – 290.
- Nestingen, R. S.: 2007, 'The Comparison of Infiltration Devices and Modification of the Philip-Dunne Permeameter for the Assessment of Rain Gardens'. Ph.D. thesis, University of Minnesota.
- NS-ISO: 2005, 'Vannføringsmalinger i åpne kanaler ved bruk av overløp og venturi kanal, Del 1 Tynnplateoverløp'. Standard Norge.
- NYS: 2010, 'New York State Stormwater Management Design Manual'. New York State Department of Environmental Conservation. New York, USA.
- Oberts, G. L.: 2003, 'Cold Climate BMPs: solving the management puzzle'. *Water Science & Technology* **48**(9), 21–32.
- Ogata, A. and R. B. Banks: 1961, 'A Solution to the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media'. *Professional Paper No. 411-A-USGS Geological Survey*. Washington D. C.
- Paus, K.: 2010, 'Matlab-script for estimering av tensjon og hydraulisk konduktivitet.'. Norges Teknisk-naturvitenskapelige Universitet.
- Paus, K.: 2011, 'Overvanns- og ledningsteknologi (VM6002) kurs'. ikke publisert materiale. forelesning 7. september 2011. Norges Teknisk-naturvitenskapelig Universitet.
- Philip, J. R.: 1993, 'Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter'. *Water Resour. Res.* **29**(11), 3763–3768.
- Pitt, R., S.-E. Chen, S. E. Clark, J. Swenson, and C. K. Ong: 2008, 'Compaction's Impacts on Urban Storm-Water Infiltration'. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **134**(5), 652–658.
- Rawls, W. J., D. Brakensiek, and K. Saxton: 1982, 'Estimation of Soil Water Properties'. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **25**(5), 1316–1320.
- Richards, L. A.: 1931, 'CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS'. *Physics* **1**(5), 318 –333.
- Richards, L. A.: 1952, 'Report on the subcommittee on permeability and infiltration, committee on terminology.'. *Soil Science Society of America Proceedings* **16:85-88**, –.
- Roseen, R. M., T. P. Ballesterro, J. J. Houle, P. Avellaneda, J. Briggs, G. Fowler, and R. Wildey: 2009, *Seasonal Performance Variations for Storm-Water Management Systems in Cold Climate Conditions*, Vol. 135. ASCE.

- SCI: 2005, '10.000 Raingardens, A plan for metropolitan Kansas City to improve water quality with rain gardens and other green solutions'. web: <http://www.sustainablecitiesinstitute.org/>.
- Smith, D. W.: 1996, *Cold regions utilities monograph*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Stenberg, E.: 2011, 'Ettermontering av regnbed i etablert by, med NVE-kvartalet som undersøkelsesområde'. Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway.
- SVV: 2005, 'Handbok 014 Laboratorieundersøkelser:14.432 Kornfordeling ved sikting'.
- TMSM: 2008, 'The Minnesota Stormwater Manual'. Minnesota Pollution Control Agency, Minnesota Stormwater Steering Committee.
- TPGC: 2007, 'Bioretention Manual'. Environmental Services Division, Department of Environmental Resources, The Prince George's County, Maryland.
- Urbanas, B., J. Guo, and K. MacKenzie: 2011, 'The Case for a Water Quality Capture Volume for Stormwater BMPs'. *Stormwater The Journal for Surface Water Quality Professionals* **Vol.12**(7), 16–23.
- USDA: 1986, 'Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55'. Technical report, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Service,.
- USDA: 2004, 'Saturated Hydraulic Conductivity: Water Movement Concepts and Class History'. *United States Department of Agriculture: Soil Survey Technical Note 6* pp. –.
- van Genuchten, M. T.: 1980, 'A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils'. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**(5), 892–898.
- Warrick, A. W., D. Zerihun, C. A. Sanchez, and A. Furman: 2005, 'Infiltration under Variable Ponding Depths of Water'. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **131**(4), 358–363.
- WDNR: 2003, 'Rain gardens, a how to manual for homeowners'. Wisconsin Department of Natural Resources. DNR Publication PUB-WT-776.
- Weiss, P. T., J. S. Gulliver, and A. J. Erickson: 2007, 'Cost and Pollutant Removal of Storm-Water Treatment Practices'. *Journal of Water Resources Planning and Management* **133**(3), 218–229.

Vedlegg A: Artikkel innsendt til VANN for fagfelleevaluering
Vedlegg B: Artikkel innsendt til Kommunalteknikk
Vedlegg C: Sammenstilling av årlig vannmengde infiltrert i Bergen, Trondheim og Ås.

A Artikkel innsendt til VANN for fagfelleevaluering

Målt og modellert hydrologisk ytelse til regnbed i Trondheim

Av Torstein Dalen, Kim H. Paus, Bent C. Braskerud og Sveinn T. Thorolfsson
Torstein Dalen er masterstudent ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk, NTNU.
Kim H. Paus er doktorgradsstipendiat ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk, NTNU.
Bent C. Braskerud er forsker ved Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE).
Sveinn T. Thorolfsson er førsteamanuensis ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk, NTNU

Sammendrag

Regnbed er en vegetert forsenkning i terrenget hvor overvann samles og infiltreres. Risvollan regnbed ble etablert høsten 2010 for forskningsformål. Det innebærer at regnbedet er kontinuerlig overvåket med vannføringsmåling inn og ut av anlegget. Vanngjennomstrømningen i regnbedet har blitt simulert ved hjelp av modellen RECARGA og resultatene har blitt sammenlignet med målinger fra høsten 2011. I tillegg har RECARGA blitt benyttet til å simulere styrtregnet som falt i Trondheim 28-29. juli 2007 samt smeltevannsmålinger fra årene 1998, 2000 og 2002. Resultatet viser at regnbed kan redusere 15-års nedbør (25.8 mm på 3 timer) med opp til 90 % for store regnbed (10 % av nedbørsfeltet) og 22 % for mindre regnbed (4 % av nedbørsfeltet). Simuleringer av smeltevannsmålinger viste at regnbed i Trondheim kan infiltrere opp til 90 % av årsnedbøren avhengig av infiltrasjonsevnen og regnbedets areal.

Measured and Modeled Hydrological Performance of a Raingarden in Trondheim

Raingardens are shallow planted depressions and facilitate a local management of stormwater. The Risvollan raingarden was established in 2010 as a pilot raingarden and the water flow through the facility have been continuously monitored throughout the fall 2011. The RECARGA model was together with the observed field data used to simulate the hydrological performance of the Risvollan raingarden. Additionally, the RECARGA model was used to simulate the hydrological performance of

a raingarden at a heavy precipitation event and also the expected annually performance by using precipitation and melt water records data from Trondheim. The simulation results indicate that raingardens can reduce the 15-year peakflow (25.8 mm in 3 hours) with up to 90% for large raingardens (i.e., 10% of catchment area) and up to 22% for smaller raingardens (i.e., 4% of catchment area). Furthermore, the results show that a standard raingarden should be capable of managing as much as 90% of the annual runoff in Trondheim.

Bakgrunn

Urbanisering og gjentetting av flater påvirker miljøet vårt i form av økt forurensning og økt overvannsmengder som må håndteres. Konvensjonell håndtering av overvann har vist seg verken å være særlig bærekraftig eller tilpasset norsk klima, og hvert år registreres det urbane flommer som medfører kjelleroversvømmelser, overløpsutslipp, og spredning av forurensning. I tillegg forventes det, som følge av klimaendringer, at intensiteten på nedbør og frekvensen av ekstremvær vil øke i Norge i fremtiden (Hansen-Bauer m.fl., 2009). Mer nedbør vil medføre økte overvannsmengder, høyere flomtopper og ytterligere spredning av forurensning, og derfor presse en infrastruktur som allerede i dag svikter.

For å imøtekomme dagens og fremtidens utfordringer har man i stadig større grad begynt å ta i bruk metoder for overvannshåndtering der vannet håndteres og behandles lokalt ved kilden. Med en slik håndtering vil vannet forbli i området og man ivaretar/gjenopptar i større grad det naturlige hydrologiske kretsløpet som rådet før urbaniseringen. Regnbed (eng. raingardens) er en bestemt løsning innenfor denne nye filosofien som i løpet av de siste årene har blitt svært populær spesielt i USA og Canada.

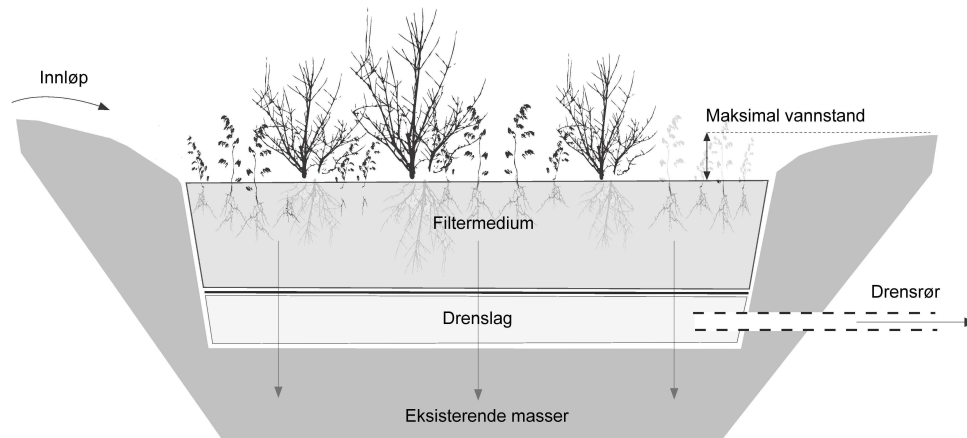
Risvollan regnbed er et pilot-regnbed som ble bygd sommeren 2010 på Risvollan, Trondheim, for forskningsformål. I denne artikkelen vil den hydrologiske ytelsen til Risvollan regnbed høsten 2011 rapporteres. Regnbedet er undersøkt ved hjelp av infiltrasjonstester i felt, infiltrasjonstester i laboratoriet, kontinuerlige målinger og simuleringer i programmet RECARGA. Dette vil danne grunnlaget for å estimere effekten regnbed har på avrenningen fra urbane nedbørsfelt og er presentert i Dalen (2012). Her vil kun resultater fra simuleringer og kontinuerlige målinger presenteres.

Regnbed

Regnbed er typisk bygd opp som en forsenkning i terrenget, fylt igjen med et filtermedium bestående av sand, jord og løv-kompost, og beplantet med vegetasjon (figur 1). Overvann generert ved nedbør og/eller snøsmelting ledes åpent til regnbedet der det lagres på overflaten og sørger på den måten å fordrøye overvannet. Vannet infiltrerer så ned i filtermediet og videre ned i grunnen. Hvis de omkringliggende massene har lav infiltrasjonsevne kan dette løses ved legge et drenerør i regnbedet som vist på figur 1. Drenerør vil kunne medføre at mer vann infiltrerer i regnbedet, men også at en mindre del av vannet når grunnvannet. Vann fra drenerøret føres videre til nedstrøms overvannssystem. I tilfeller da vannhøyden på overflaten

overskrider en bestemt høyde vil ytterligere overvann gå i overløp og videre ut til planlagte flomveier.

Plantene bidrar til et godt estetisk uttrykk samt opprettholder permeabiliteten i jorden. Filtermediets hovedoppgave er å gi gode vekstvilkår for vegetasjon. I tillegg vil filtermediet fjerne partikler og mye av de løste forurensningene i overvannet. Fordrøyningskapasiteten på regnbedet kan økes ved å legge inn et sjikt bestående av pukkk med høy porøsitet under filtermediet.



Figur A.1: Oppbygging av regnbed

Metode

Risvollan Regnbed

Nedbørsfeltet tilknyttet Risvollan regnbed er på 0,83 ha, der impermeable flater utgjør ca. 13 %. Det øvrige arealet er gress på leirjord. Regnbedet er konstruert ved å fjerne opprinnelig leirjord og fylle inn sandholdig matjord med kompost. Drensrør er lagt på bunn av regnbedet. Regnbedet har ett areal på 40 m² (ved maksimal vannstand på 16.0 cm), noe som utgjør ca. 0,5 % av arealet på nedbørsfeltet. Med en filterdybde på 0,75 m, og en gjennomsnittlig porøsitet på $50,0 \pm 2,0$ % er regnbedets vannlagringskapasitet beregnet til å være 13,0 m³.



Figur A.2: Nyanlagt regnbed på Risvollan; innløp til høyre (1), overløp midt på (2) og drensutløp til venstre (3). Foto Arvid Ekle

Risvollan regnbed er installert med tre V-overløp med tilhørende trykksensorer for å estimere vannføringen i innløpet, drensrøret og overløpet (figur 2). En vanntett PE-membran omslutter filtermediet slik at vann ikke infiltrerer til grunnen. På den måten har en god kontroll på vannbalansen for regnbedet. Data for korttidsnedbør er hentet fra Risvollan urbanhydrologiske målestasjon (Thorolfsson et al. 2003)

For å vurdere den hydrologiske ytelsen til regnbedet ble vannføringsmålingene benyttet til å beregne spissvannføringsreduksjon k_L (ligning 1), forsinkelsestid t_L (ligning 2), og antall vannstandstimer t_D (ligning 3).

$$k_L = 1 - \frac{Q_{maks,ut}}{Q_{maks,inn}} \quad (43)$$

$$t_L = t_{(maks,ut)} - t_{maks,inn} \quad (44)$$

$$t_D = t_{H=0} - t_{H2=0} \quad (45)$$

Der $Q_{maks,ut}$ (l/s) er spissvannføringen ut av regnbedet (overløp pluss dreisløp ved samme tidspunkt), $Q_{maks,inn}$ (l/s) er spissvannføringen inn i regnbedet, $t_{maks,ut}$ er tid ved spissvannføringen ut av regnbedet, $t_{maks,inn}$ er tid ved spissvannføringen inn i regnbedet, $t_{H=0}$ er tid når vann begynner å lagres på overflaten i regnbedet og $t_{H2=0}$ er tid ved null synlig vann i regnbedet etter en nedbørshendelse. Det vil si at vannstandstimer t_D er antall sammenhengende timer med vann på overflaten i regnbedet.

Spissvannføringsreduksjonen gir informasjon om reduksjonen av flomtappen og kan benyttes til å bestemme den faktiske avlastningen av nedstrøms overvannssystem. Tilsvarende gir forsinkelsestiden informasjon om fordrøyningseffekten i regnbedet.

Simulering i RECARGA

RECARGA ble benyttet for å simulere hydrologien i regnbedet. RECARGA er utviklet ved University of Wisconsin-Madison og benytter Green-Ampt til å beregne infiltrasjon i regnbed. Totalt tre infiltrasjonslag kan defineres i modellen (to i regnbedet og en omkringliggende masse). Van Genuchten's ligninger benyttes for å beregne perkolasjonen mellom lagene. RECARGA beregner i 1-D og antar en skarp vannfront ved infiltrasjon. I simuleringene ble de registrerte time-verdiene for vannføringen i innløpet benyttet som inndata i RECARGA. I tillegg er det benyttet data fra snøsmeltebrett ved Risvollan urbanhydrologiske feltstasjon for å estimere andelen av årsnedbøren som kan infiltrere i regnbedet. Dataene fra snøsmeltebrettet tilsvarer da avrenningen fra en impermeabel flate. Fordampning fra overflaten på regnbedet ble antatt ubetydelig og derfor neglisjert i simuleringene. Dette innebærer at vanninnholdet i regnbedet vil være noe høyere ved starten på en nedbørshendelse i simuleringen i forhold til virkeligheten, fordi vann som har fordampet mellom nedbørshendelsene ikke er tatt hensyn til.

Data fra Risvollan ble brukt til å kalibrere RECARGA ved å endre vannmettet hydraulisk konduktivitet (K_{sat}) til optimal tilpasning til målte data. To metoder ble brukt: (1) Alle dataene ble sett under ett. Det innebærer en konstant K_{sat} fra juli til oktober 2011. (2) Dataene ble brukt måned for måned. Det innebærer at K_{sat} vil variere fra måned til måned, slik at en optimal tilpasning til dataene oppnås på månedsbasis.

RECARGA ble benyttet til å simulere et 15-års regn, samt tre sammenhengende år med nedbør og smeltesdata. Et standard regnbed (slik som på Risvollan) med 75 cm filterdybde, 20 cm maksimal vannstand på overflaten, drenerør med diameter 110 mm og vannmettet hydraulisk konduktivitet på 2.5 cm/t i omkringliggende masser har blir brukt i simuleringen

Som resultater av simuleringene gir RECARGA vannbalansen for hvert tidssteg som videre benyttes til å konstruere utløpshydrografer for drenerutløpet, overløpet og infiltrasjon til omkringliggende masser. Dette danner så grunnlaget for å beregne

vannbalansen for hele simuleringsperioden, samt spissvannføringsreduksjoner og forsinkelsestider. Som ett mål på hvor godt den simulerte utløpshydrografen stemmer med den målte utløpshydrografen ble Nash-Sutcliffe koeffisienten (Nash og Sutcliffe, 1970) benyttet (likning 4).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_{m\ddot{a}lt} - Q_{simulert})^2}{(Q_{m\ddot{a}lt} - \bar{Q}_{m\ddot{a}lt})^2} \quad (46)$$

Hvor Q (l/min) er vannføring og \bar{Q} (l/min) er gjennomsnittlig målt vannføring. R^2 er Nash-Sutcliffe-koeffisienten som varierer fra minus uendelig til 1, hvor 1 tilsvarer en perfekt tilpasning.

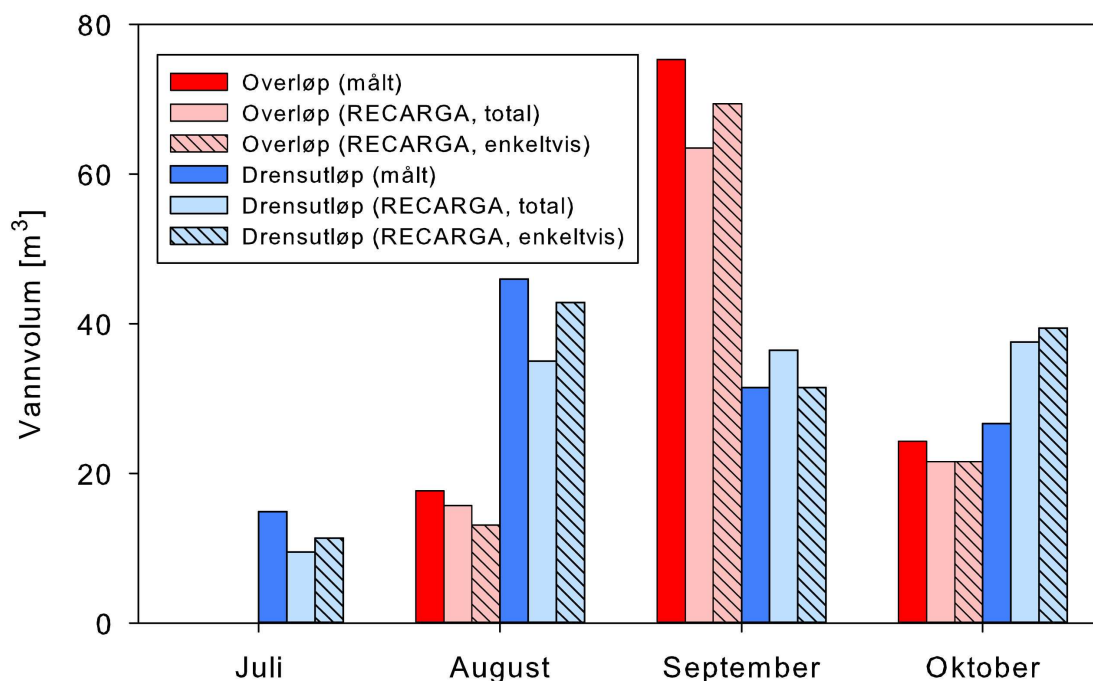
Resultater og diskusjon

Høsten 2011

Gjennom høsten 2011 ble det registrert 17 nedbørshendelser ved Risvolla. Av disse hadde 12 hendelser en spissvannføringsreduksjon på over 70 %. Forsinkelsestiden varierte fra 2 til 400 minutter. Gjennomsnittlig forsinkelsestid var 97 minutter.

Vannmengder

Vannmengder transportert gjennom regnbedet er vist i figur 3; målt og simulert. Kalibrering av alle månedene sett under ett gav en hydraulisk konduktivitet på 1.4 cm/t. Ved å betrakte hver måned separat ble det for juli, august, september og oktober beregnet hydrauliske konduktiviteter på henholdsvis 2.2, 2.0, 0.8 og 1.4 cm/t. I juli er det kun målt avrenning gjennom drensørene. I september var avrenningen gjennom overløpet det dobbelte av dreneringen. Som vist i figur 3 medførte månedlig kalibrering noe bedre tilpassing enn bruk av gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet for juli-oktober.



Figur A.3: Sammenligning av målte vannmengder mot simulert vannmengder i RECARGA

Tabell 1 oppsummerer Nash-Sutcliffe-koeffisienten for de simulerte utløpshydrogrammene. Hendelsene med vannstand er definerte som tiden fra første registrerte vannstand i regnbedet til siste registrerte vannstand i regnbedet. Tilsvarende er overløps-hendelsene definert som tiden fra første registrerte vannmengde i overløp til siste registrerte vannmengde i overløp. Hendelsene til drensutløpet gjelder hele måneder, da det til nesten en hver tid er registrert vannføring i drensutløpet.

Tabell 13: Nash-Sutcliffe-koeffisienter for enkelthendelser. Koeffisienter på 1.0 betyr perfekt tilpassing

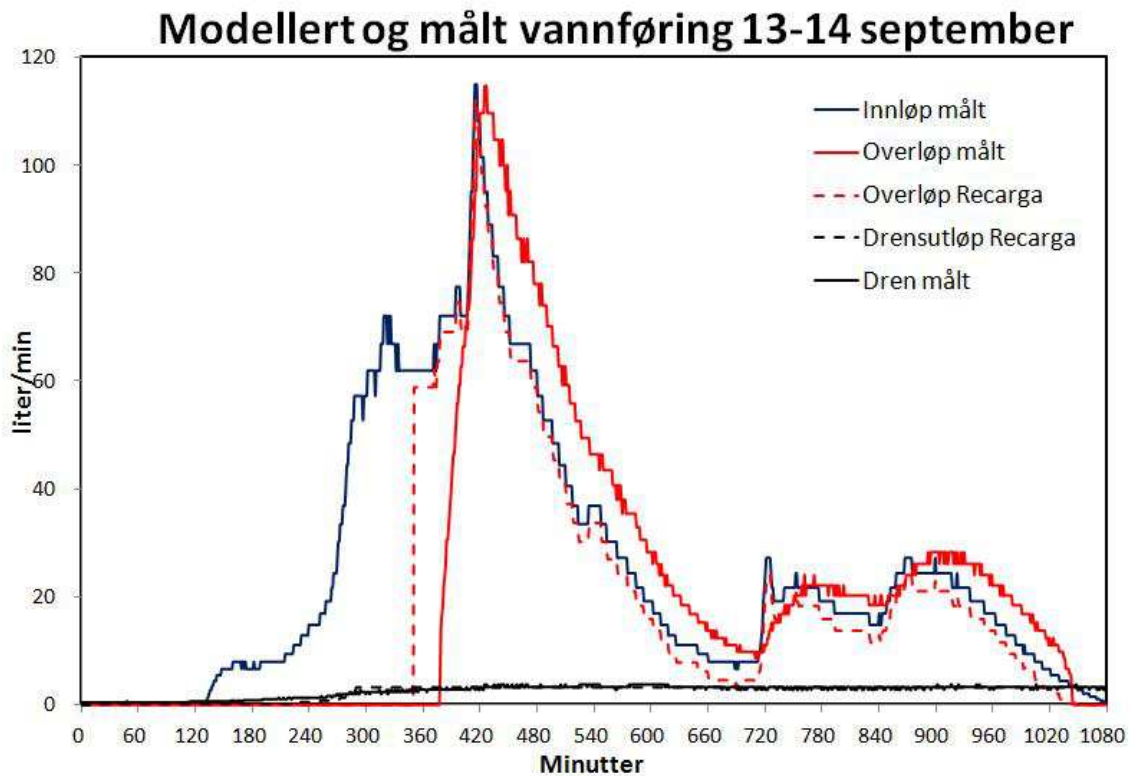
Enkelthendelser	Vannstand i regnbedet	Overløp	Drensutløp
Juli	0.85	ikke overløp	0.7
August	0.80	ikke overløp	0.41
August	0.90	-0.81	
August	0.95	0.41	
September	0.80	-2.82	0.62
Septmeber	0.75	0.95	
September	0.79	0.84	
Oktober	-1.03	ikke overløp	-3.50
Oktober	0.64	0.19	
Oktober	0.67	-0.81	
Oktober	0.48	-3.38	

Foruten første hendelsen i oktober, estimerer RECARGA vannstanden i regnbedet godt. Første hendelsen i oktober gav en liten vannstand i regnbed, og dermed medførte RECARGAs 1-D simulering av regnbedets geometri stort utslag. Både første overløpshendelse i august og september hadde lave vannføringer (maksimal vannføring 0.3 l/s i overløp), noe som gjør at forenklingene i RECARGA gjør utslag i dårlig korrelasjon. Både overløp og drensutløp ble dårlig estimert i oktober. Dette skyldes at målte verdier i overløp og drensutløp er langt høyere enn estimert ved hjelp av RECARGA. Vannbalansen for målte verdier i oktober har et avvik på 15 %. Dermed er det antakeligvis målefeil i et eller flere V-overløp som medfører lave Nash-Sutcliffe-koeffisienter i oktober.

Simulering med minuttverdier

For å undersøke i hvilken grad RECARGA klarer å estimere utløpshydrografen for nedbørshendelser på minuttbasis, er enkelthendelser simulert med minuttverdier. Korte tidssteg er nødvendig for å få et godt estimat på spissvannføringen. Med tidssteg på en time ville spissvannføringen blitt vesentlig lavere.

Figur 4 viser hendelsen 13-14. september 2011 på minuttbasis. Nash-Sutcliffe koeffisientene for overløp er 0.71 og for drensutløpet 0.85, noe som tilsvarer en god tilpasning.



Figur A.4: 13-14. september 2011 målt og simulert

Årsaken til at til at overløpet starter tidligere i RECARGA enn ved målte data har i hovedsak to årsaker: (1) Vanninnholdet ved start kan være lavere enn initialbetingelsen i RECARGA, og (2) RECARGA tar ikke hensyn til skrå kanter i regnbedet. Det vil si at RECARGA estimerer med ca 1.5 m³ mindre lagringsvolum på overflaten enn hva det i virkeligheten er, noe som vil føre til at RECARGA estimerer enn for tidlig start på vannføringen i overløp.

RECARGA bruker massebalanse for vannmengder på overflaten i regnbedet for å beregne vannmengdene i overløp. Dermed vil ikke RECARGA beregne en vannstand høyere enn maksimal vannstand i regnbedet. Det medfører at RECARGA ikke kan beregne større vannmengder i overløp enn i innløp for det aktuelle tidsskrittet, slik det kan være i virkeligheten. Regnbedet på Risvollan har trangere utløp (120 grader) enn innløp (160 grader). Vannstanden vil derfor øke med økende avrenning.

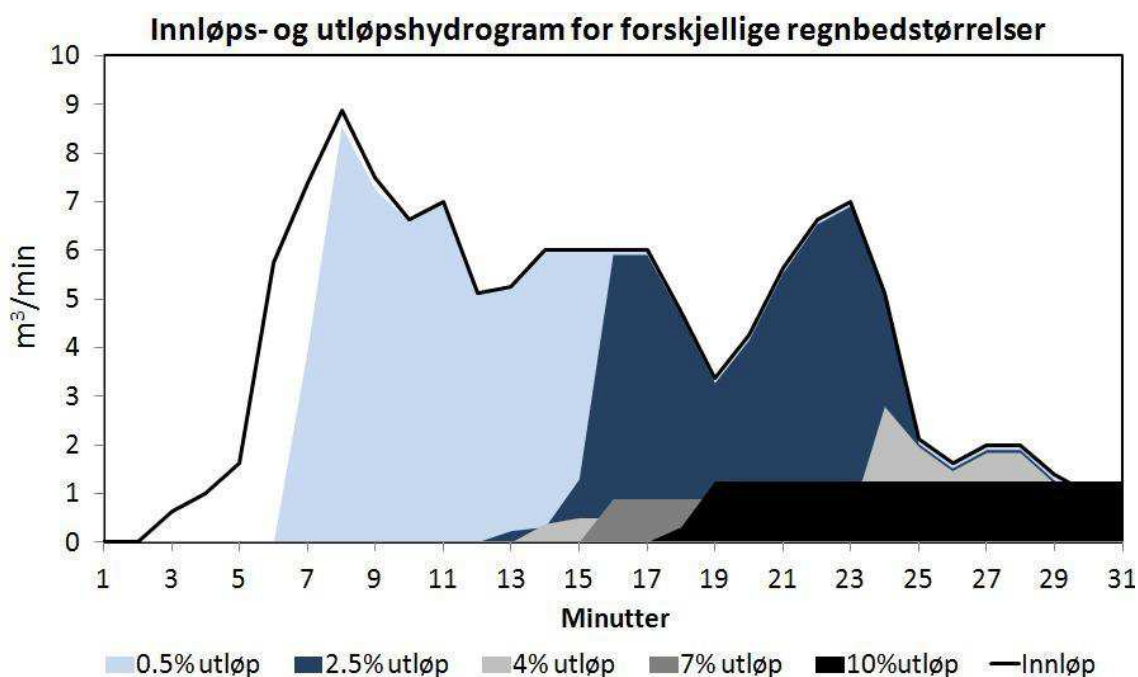
Tilsvarende simuleringer med minuttstidsteg for nedbørshendelser 27. mars til 2. april 2012 har gitt Nash-Sutcliffe koeffisienter fra 0.64 til 0.98 for drensutløp, overløp og vannstand. Simuleringer med minuttstidsteg ser derfor ut til å gi et relativt godt estimat på utløpshydrogrammene.

Simulering av styrtregn

For å undersøke i hvilken grad regnbed kan senke spissvannføringen fra større nedbørshendelser, og hvor stort et regnbed må være avhengig av ønsket spissvannførings-

reduksjon, er et styrtregn fra Risvollan Urbanhydrologiske målestasjon simulert.

Figur 5 viser resultatet fra RECARGA for de 30 mest intense minuttene av en nedbørshendelse 28-29. juli 2007. Hendelsen tilsvarer et tre timer langt 15-årsregn (25.8mm), hvor de 20 mest intense minuttene tilsvarer ca. et 9-årsregn (11.7 mm). Nedbørshendelsen har blitt simulert med nedbøren som falt fra 28. juni 2007 kl 00:00, for å få en initialbetingelse (vanninnhold i regnbedet) som tilsvarer det regnbedet i virkeligheten ville hatt da 15-årsregnet kom. Hydraulisk konduktivitet for denne simuleringen er satt til 10.0 cm/t og maksimal vannstand er satt til 20.0 cm. Til sammenligning målte Asleson (2009) geometrisk gjennomsnittlig vannmettet hydraulisk konduktivitet i 8 regnbed til 12 cm/t. Simuleringen er gjort for regnbed med overflateareal tilsvarende 0,5, 2,5, 4,0, 7,0 og 10 % av nedbørsfeltet. Nedbørsfeltet er satt til 1.0 ha med 100 % impermeable flater.



Figur A.5: Vannføring til regnbed under et styrtregn i Trondheim 28-29. juli 2007. Avrenning gjennom dren og overløp avhenger av regnbedets andel av nedbørsfeltet.

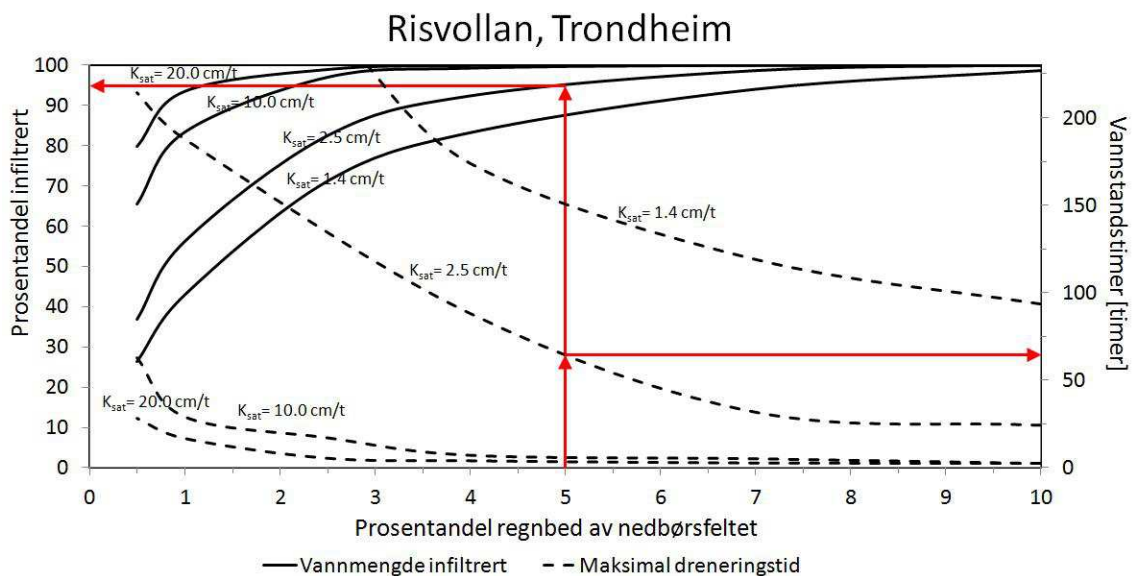
Spissvannføringen reduseres med økende regnbedareal. Reduksjonen var 4%, 22%, 90% og 86% for regnbedareal fra 0.5 % til 10 % av nedbørsfeltets areal (figur 5). Fordi vann ikke går i overløp for regnbedareal fra 7 – 10 % av nedbørsfeltet, er spissvannføringsreduksjonen for disse arealene kun avhengig av areal og infiltrasjonsevnen. Siden infiltrasjonsevnen er holdt konstant vil det minste regnbedet gi minst vannføring i drensledningen, og dermed gir 7% regnbedareal større spissvannføringsreduksjon enn 10% regnbedareal. For regnbedarealene hvor vann går i overløp (< 4 %), er spissvannføringsreduksjonen i tillegg avhengig av formen på nedbøren.

Forsinkelsestiden (beregnet etter ligning 2) fra 0.5 % til 10 % overflateareal er 0, 15, 16, 97 og 38 minutter. Forsinkelsestiden på 15 minutter for regnbed på 2.5% av nedbørsfeltet skyldes flomtopp nr 2. inn i regnbedet (ved 23 min, figur 5). Lang

forsinkelsestid for regnbedareal fra 7 til 10%, skyldes at regnbedene raskt oppnår maksimal infiltrasjonsrate som deretter er konstant over en lengre periode. Tiden for maksimal vannføring ut er da satt til midten av perioden med konstant vannføring ut. Denne perioden er lengst for regnbedarealet på 7% fordi vannmengden videreført i drensutløpet er mindre enn for regnbedarealet på 10%.

Simulering av årsnedbør

Figur 6 viser hvilken andel av årsnedbøren som kan forventes å infiltrere i regnbed avhengig av areal og infiltrasjonsevne og maksimalt antall timer med vannstand man kan forvente i regnbedet. Inndata til RECARGA er målinger fra snøsmeltebrettet på Risvollan urbanhydrologiske målestasjon årene 1998, 2000 og 2002. Ved å bruke målingene fra snøsmeltebrettet vil man da simulere avrenningen gjennom året fra en impermeabel flate.



Figur A.6: Data fra smeltebrettet på Risvollan viser at store deler av årsnedbøren kan infiltreres.

Av figur 6 kan man for eksempel lese av (rød strek) at for et regnbed som er 5 % av nedbørsfeltet og har en vannmettet hydraulisk konduktivitet på 2.5 cm/t ,vil kunne infiltrere ca. 95 % av årsnedbøren og på det meste ha ca. 65 sammenhengende timer med vannstand i regnbedet. Hvor stor andel av årsnedbøren som infiltrerer er viktig av to årsaker. (1) Andelen som infiltrerer i løpet av året vil si hvor mye vann som kan gå til grunnvann. (2) Andelen som infiltrerer er bestemmende for hvor mye overvann som blir renset i regnbedet.

Dreneringstiden er viktig å ha kjennskap til på grunnlag av tre forhold: (1) Mange planter tåler bare å stå en viss periode i vann, (2) regnbedet må være drenert for vann innen en viss tid for å være klart til neste nedbørshendelse, (3) lange perioder

med stående vann kan gi myggproblemer (TPGC 2007). Amerikanske dimensjoneringsmanualer for regnbed fra henholdsvis Maryland og Minnesota anbefaler 2-3 dager som maksimal dreneringstid (TPGC 2007, TMSM 2008).

Figur 6 kan for eksempel brukes til å estimere effekten av Risvollan regnbed på årlig avrenning: Nedbørsfeltet til Risvollan regnbed har 13% tette flater og resten gress. Antar man en avrenningskoeffisient på 0.2 for gresset, kan man grovt estimere en avrenning fra Risvollan ($13\% + 0.2 * 87\%$) tilsvarende avrenningen fra 30% impermeable flater. Risvollan regnbed har da et areal på ca 1% av dette. Av figur 6 kan man se at 1% regnbedareal og hydraulisk konduktivitet på 1.4cm/t gir en årlig infiltrert vannmengde på ca 43%. Til sammenligning infiltrerte Risvollan regnbed 52% av vannmengdene i innløpet høsten 2011.

Konklusjoner

Risvollan regnbed har, til tross for lav infiltrasjonsevne (0.8-2.2cm/t), hatt en god reduserende effekt på avrenningen fra området. Ca. 52% av vannmengdene inn i regnbedet har blitt infiltrert. Spissvannføringsreduksjonen har for 12 nedbørshendelser høsten 2011 vært på over 70%, forsinkelsestiden har variert fra 2 til 400 minutter.

RECARGA har vist seg godt egnet til å estimere årlige vannmengder infiltrert. Data fra snøsmeltevannsbrett kan brukes til å estimere dette. Selv små regnbed kan infiltrere store deler av årsnedbøren. Man må imidlertid være oppmerksom på at små regnbed vil få lengre tid med vannstand i regnbed, noe som kan drukne plantene med mindre man velger arter som tåler et vannrikt miljø.

Videre kan RECARGA estimere utløpshydrografene for dremsutløp og overløp på en god måte, slik at spissvannføringsreduksjon og forsinkelsestid kan bestemmes. Det har blitt vist at regnbed kan redusere flomtoppen fra et tre timers langt 15 års regn med opp til 90 % avhengig av regnbedets areal.

Takk

Risvollan regnbed er støttet økonomisk og praktisk av Interreg 4b-prosjektet SAWA (www.sawa-project.eu), Framtidens byer (www.framtidensbyer.no), Trondheim kommune (www.trondheim.kommune.no), NVE (www.nve.no) og NTNU (www.ntnu.no).

Referanser

Asleson, B. C., R. S. Nestingen, J. S. Gulliver, R. M. Hozalski, and J. L. Nieber: 2009, 'Performance Assessment of Rain Gardens'. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 45(4), 1019-1031.

Dalen, T.:2012. masteroppgave: Hydrologisk dimensjonering av regnbed i Norge, Institutt for Vann- og Miljøteknikk, Norges Teknisk-naturvitenskapelige Universitet

Hanssen-Bauer, I., H. Drange, E.J. Førland, L.A. Roald, K.Y. Børsheim, H. Hisdal, D. Lawrence, A. Nesje, S. Sandven, A. Sorteberg, S. Sundby, K. Vasskog og B. Ådlandsvik, 2009. Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing, Norsk Klimasenter, september 2009, Oslo.

Muthanna, T. M.: 2007, 'Bioretention as a Sustainable Stormwater Management Option in Cold Climates'. Isbn 978-82-471-0993-9, Norges Teknisk-naturvitenskapelig Universitet.

Nash, J. and J. Sutcliffe: 1970, 'River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles'. Journal of Hydrology 10(3), 282 – 290.

Nesting, R. S. 2007. Master Thesis: The Comparison of Infiltration Devices and Modification of the Phillip-Dunne Permeameter for the Assessment of Raingardens. University of Minnesota, USA.

Thorolfsson, S. T., B. V. Matheussen, H. Frisvold, O. Nilsen, V. Kristiansen and A. Pedersen-Øverleir. 2003. Urban Hydrological Data Collection in Cold Climate. Experiences at Risvollan, Trondheim, Norway. 1st International conference on Urban Drainage and Highway Runoff in cold climate, Riksgransen, Sweden.

TMSM : 2008, 'The Minnesota Stormwater Manual'. Minnesota Pollution Control Agency, Minnesota Stormwater Steering Committee

TPGC : 2007, 'Bioretention Manual'. Environmental Services Division, Department of Environmental Resources, The Prince George's County, Maryland

B Artikkel innsendt til Kommunalteknikk

Vurdering av regnbeds hydrologiske ytelse

Masterstudent Torstein Dalen ved Institutt for Vann- og Miljøteknikk, NTNU.
torsteindalen@hotmail.no

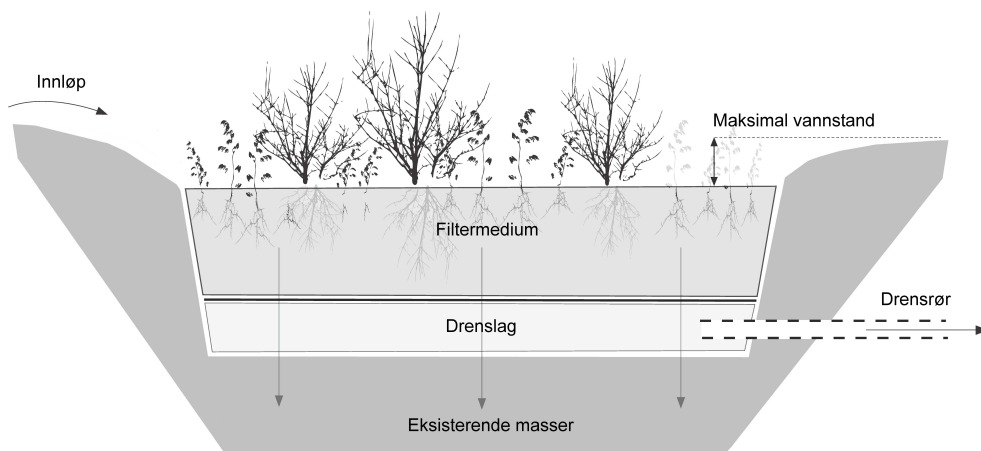
Økt andel tette flater i byene gir økte overvannsmengder som må håndteres. Klimaforandringene vil gi hyppigere og mer intens korttidsnedbør. Lokal overvannshåndtering (LOH) er en strategi som søker å imøtekomme disse utfordringene ved å håndtere overvannet nærmest mulig kilden. Norsk Vanns 'Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering' presenterer en tre-ledds strategi for å håndtere overvannet: (1) Infiltrer avrenning fra mindre regn. (2) Forsink og fordrøy moderate nedbørstilfeller. (3) Sikre åpne flomveier fra større nedbørstilfeller. Regnbed er et tiltak i kategorien lokal overvannsløsning og inngår i ledd (1) og (2). I Norge er det lite erfaring med regnbed. Denne artikkelen foreslår en metode for kartlegging av regnbeds hydrologiske ytelse.

Regnbed

Regnbed er en vegetert forsenkning i terrenget med et filtermedium bestående av sand og kompost (typisk løvkompost) og beplantet på overflaten (figur 1 og 2). Overvannet lagres på overflaten i regnbedet opp til en viss vannstand. Når denne vannstanden nås går ytterligere vann i overløp. Filtermediets oppgave er å være et vekstmedium for vegetasjon, filtrere ut partikler og binde til seg forurensninger. Regnbedets forsenkning fordeler vannet på overflaten og bidrar til fordrøyning. Plantene sørger for et godt estetisk inntrykk samt opprettholder permeabiliteten i jorden.



Figur B.1: Risvollan regnbred (foto Arvid Ekle)



Figur B.2: Skjematisk oppbygging av regnbred (K. Paus 2012)

Infiltrasjonsevne

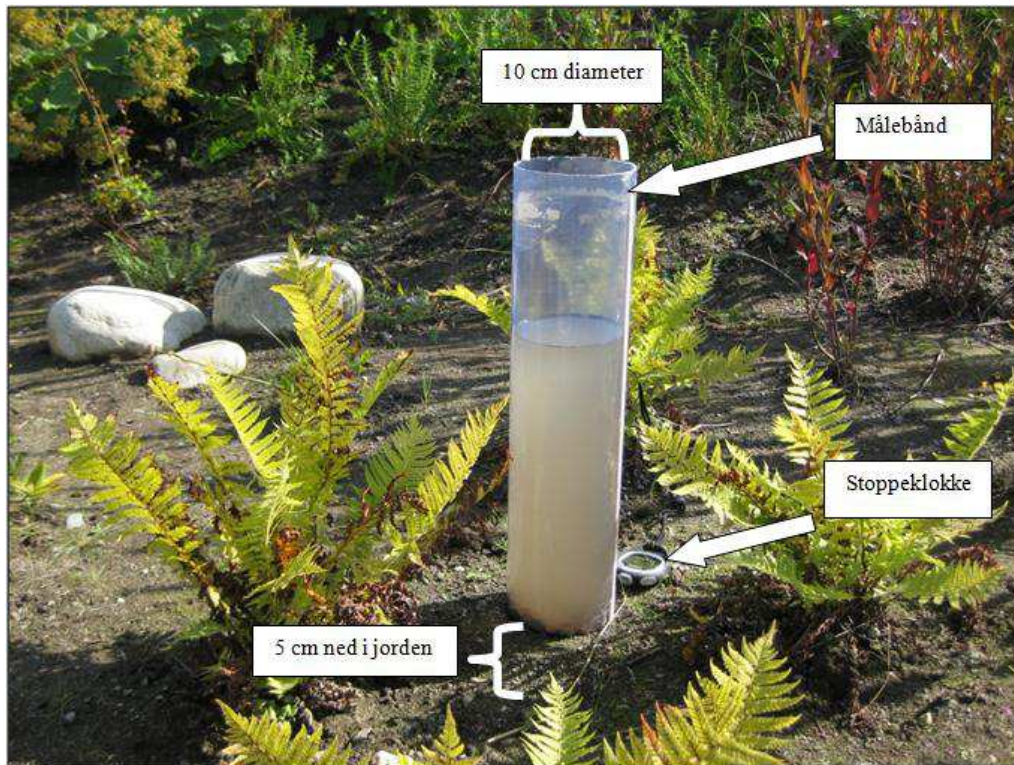
Infiltrasjonsevne målt i vannmettet hydraulisk konduktivitet (cm/time) er en av nøkkelfaktorene for infiltrasjonsløsninger slik som regnbed. Infiltrasjonsevnen er bestemmende for hvor lenge det er stående vann i regnbedet. Regnbed dimensjoneres med en viss dreneringstid (tiden fra maksimal vannstand til filtermediet er drenert tomt). Anbefalte verdier er 2-3 døgn. Det er flere årsaker til å sette en maksimal dreneringstid: (1) Stående vann over lang tid kan ødelegge vegetasjonen. (2) Regnbedet er avhengig av å dreneres tomt for vann mellom nedbørshendelsene for å fungere optimalt. (3) Stående vann kan føre til mygg problemer. (4) Infiltrasjonsevnen påvirker hvor mye av årlig vannmengde som kan infiltrere i regnbedet. Andelen av årsnedbøren som infiltrerer i regnbedet har betydning for hvor stor del av overvann som kan etterfylle grunnvannstanden og renses i filtermediet.

Infiltrasjonsevnen kan bestemmes på forhånd ved valg kornkurve for filtermediet. Ved å bruke drenerør i bunn av regnbedet blir filtermediets infiltrasjonsevne dimensjonerende. Alternativet er å utelate bruk av drenerør. Da kan infiltrasjonsevnen til omkringliggende masse (eksisterende masser, figur 2) bli dimensjonerende hvis denne er lavere enn filtermediets infiltrasjonsevne.

Modified Phillip-Dunne infiltrometer

Modified Phillip-Dunne Infiltrimeter (MPD) er utviklet ved University of Minnesota. MPD-tester måler infiltrasjonsevnen i et bestemt punkt på overflaten. Fordelen med MPD-undersøkelser er at infiltrasjonsevnen blir målt på overflaten og raskt lar seg utføre.

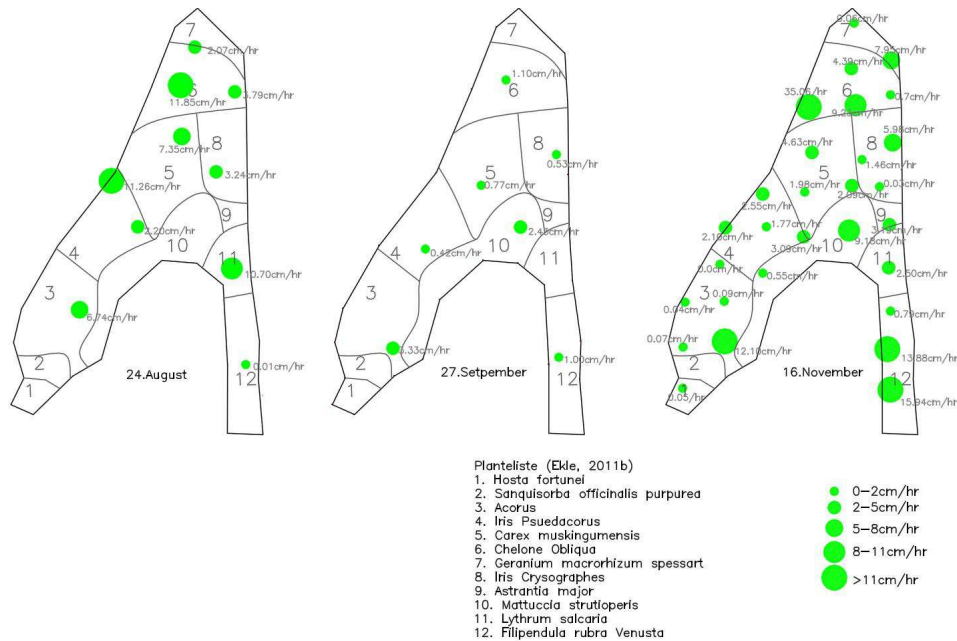
Figur 3 viser en MPD brukt til å kartlegge infiltrasjonsevnen i Risvollan regnbedet. I denne undersøkelsen ble det benyttet MPD infiltrometer med høyde ca. 50 cm og med 10 cm omkrets. Før man begynner målingene må volumetrisk vanninnhold i jorden måles. (Dette er gjort ved å ta jordprøver og måle vanninnhold i laboratoriet.) Deretter ble MPD-kolonnen plassert fem cm ned i jorden, og ble videre fylt med vann til 43 cm over jorden. Deretter ble vannstanden lest av med jevne mellomrom frem til røret er tomt. For å registrere hvordan vannstanden endrer seg over tid er det festet et målebånd på utsiden av MPD-kolonnen. Til slutt måles vanninnhold i jorden der MPD-kolonnen stod. Jorden er da vannmettet. Resultatet brukes til å estimere vannmettet hydraulisk konduktivitet.



Figur B.3: Modified Phillip-Dunne infiltrometer i bruk

Resultater fra feltmålinger

Infiltrasjonsevnen varierer i løpet av året og rundt om i regnbedet. Figur 4 viser infiltrasjonsevnen i Risvollan regnbed ved forskjellige felkundørsøkelser.



Figur B.4: Infiltrasjonsforsøk viser stor variasjon i infiltrasjonsevne på overflaten i regnbedet.

Vannmettet hydraulisk konduktivitet varierte 0 til 35cm/t. Årsaken kan være kombinasjonen av ulik kompaktering, gjentetting av filtermediet pga. finstoff og biologisk aktivitet fra planter og dyr. Dette vil også føre til at infiltrasjonsevnen endrer seg over tid.

Risvollan regnbed er kontinuerlig overvåket med V-overløp som måler vannføringene inn og ut av regnbedet. Dette har gjort det mulig å simulere regnbedets ytelse ved hjelp av programmet RECARGA. RECARGA er et program utviklet ved University of Wisconsin-Madison, USA. Ved å endre vannmettet hydraulisk konduktivitet i RECARGA har modellen blitt kalibrert til best mulig tilpasning til de målte dataene. En grundigere gjennomgang av modelleringen i RECARGA finnes i Dalen (2012). Tabell 1 presenterer resultatet fra MPD-forsøk og RECARGA.

Tabell 14: Vannmettet hydraulisk konduktivitet (cm/time) målt med MPD og simulert ved hjelp av RECARGA

Måned i 2011	Geometrisk gjennomsnitt fra MPD	RECARGA
August	2.8	2.0
September	1.1	0.8
Oktober/November	1.2	1.4

Noe forskjell i infiltrasjonsevne mellom MPD og RECARGA må forventes fordi RECARGA tar hensyn til vannføringen i løpet av hele måneden, mens MPD-forsøket viser infiltrasjonsevnen den dagen testen ble utført.

Konklusjon

MPD-tester i regnbed viser hvordan infiltrasjonsevnen varierer på overflaten. Det gjør det mulig å oppdage områder hvor finstoff fra overvannet har tettet overflaten i regnbed, og dermed om tiltak for å bedre infiltrasjonsevnen bør utføres.

Kontinuerlige vannføringsdata som er simulert ved hjelp av RECARGA gir et godt samsvar med det geometriske gjennomsnittet av MPD-testene. Det er dermed er mulig å kontrollere om regnbedet har den infiltrasjonsevnen som var tiltenkt før bygging, og dermed om regnbedet har tilstrekkelig kapasitet til å ta unna det overvannet det er dimensjonert for.

Takk

Risvollan regnbed er støttet økonomisk og praktisk av Interreg 4b-prosjektet SAWA (www.sawa-project.eu), Framtidens byer (www.framtidensbyer.no), Trondheim kommune (www.trondheim.kommune.no), NVE (www.nve.no) og NTNU (www.ntnu.no). Spesielt takk til førsteamanuensis Sveinn T. Thorolfsson og phd. student Kim Paus som var hovedveileder og biveilder for masteroppgaven. Stor takk til forsker Bent C. Braskerud ved NVE for oppfølging av arbeidet ved Risvollan regnbed.

Referanser

Atchison, D. and L. Severson: 2004, 'RECARGA User's Manual'. University of Wisconsin Madison, Civil and Environmental Engineering Department, Water Resources Group

Dalen, T.:2012. masteroppgave: Hydrologisk dimensjonering av regnbed i Norge, Institutt for Vann- og Miljøteknikk, Norges Teknisk-naturvitenskapelige Universitet

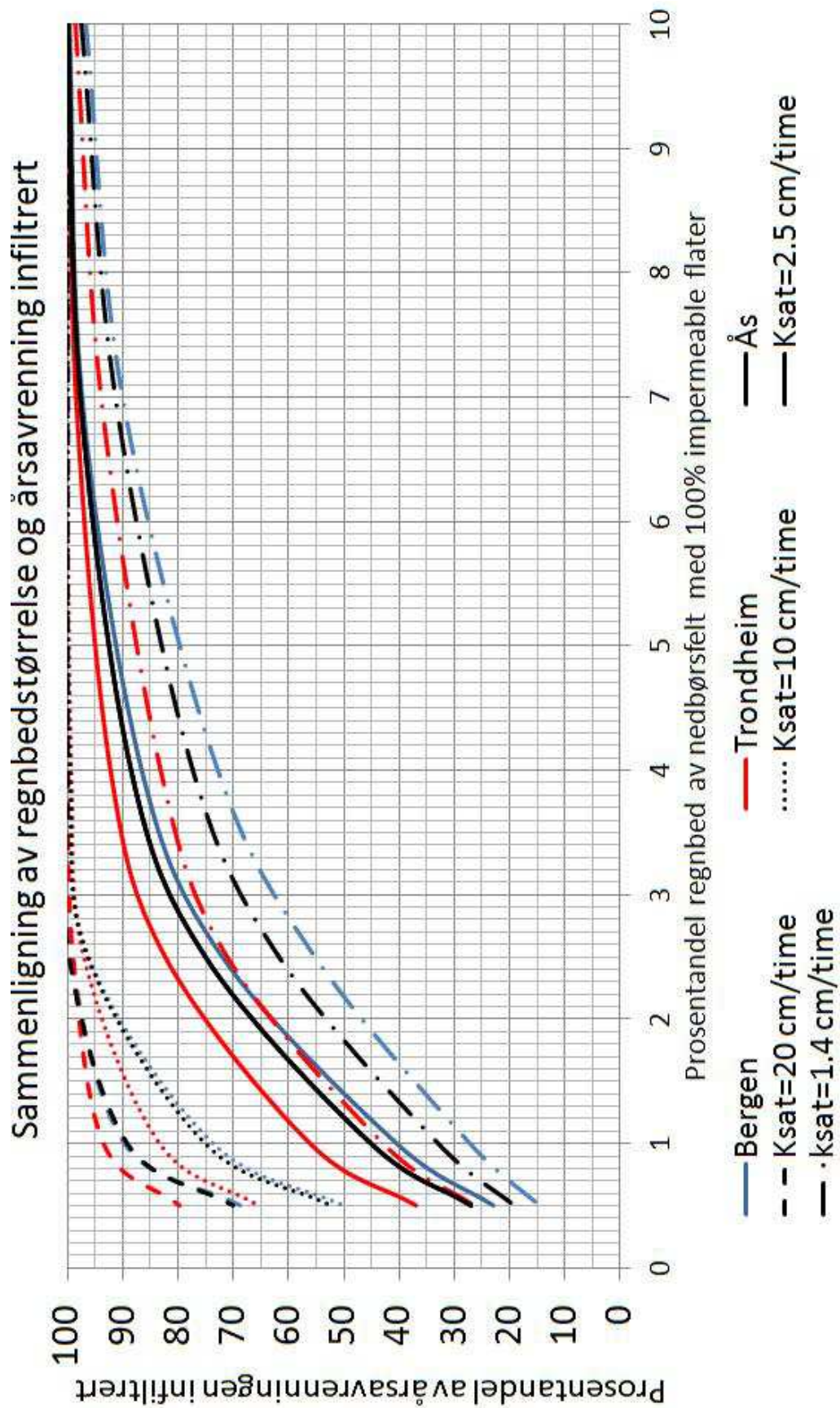
Lindholm, O., S. Endresen, S. Thorolfsson, S. Saegrov, G. Jakobsen, and L. Aaby: 2008, 'Veiledning til klimatilpasset overvannshandtering'. Norsk Vann rapport 162.

Nestingen, R. S. 2007. Master Thesis: The Comparison of Infiltration Devices and Modification of the Phillip-Dunne Permeameter for the Assessment of Raingardens. University of Minnesota, USA.

TMSM : 2008, 'The Minnesota Stormwater Manual'. Minnesota Pollution Control Agency, Minnesota Stormwater Steering Committee

TPGC : 2007, 'Bioretention Manual'. Environmental Services Division, Department of Environmental Resources, The Prince George's County, Maryland

C Sammenligning av regnbeds ytelse i Bergen, Trondheim og Ås



Figur C.1: Årlig infiltrasjon i Bergen, Trondheim og Oslo