

## Forslag til dimensjonering og utforming av regnbed for norske forhold

Av Kim H. Paus og Bent C. Braskerud

Kim H. Paus er PhD student ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.

Bent C. Braskerud er forsker ved NVE.

### Summary

**Suggestions for designing and building rain-gardens for Norwegian conditions.** Raingardens are constructed as shallow vegetated depressions and are generally considered a flexible practice for local stormwater management. Surface runoff is stored at the surface before it percolates to the ground or discharged into the stormwater system. Flood risk is reduced through retention and volume reduction of the surface runoff. This paper considers design principles for raingardens based on international and Norwegian experiences. The following topics are discussed: Facility location, sizing, criteria for existing soils and filter media compositions, vegetation strategies, and maintenance. Raingardens have become popular in many parts of the world but are so far not implemented as a common practice in Norway. In order to make raingardens a more appealing practice in Norwegian cities and communities this paper seeks to give guidance on how to design and build raingardens.

### Sammendrag

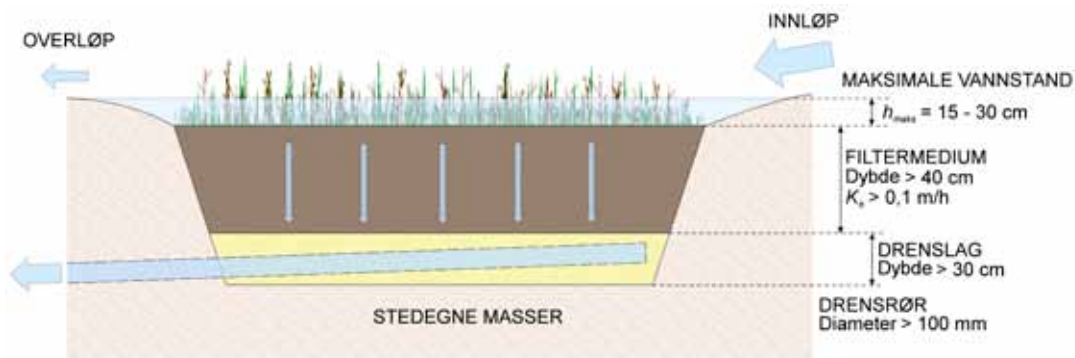
Regnbed er et fleksibelt tiltak for lokal disponering av overvann. Anlegget fremstår som en beplantet forsinking i terrenget der vann lagres på overflaten og infiltrerer til grunnen eller overvannsnett. Gjennom fordøyning og reduksjon av avrenningen hindres skadelig oversvømmelse.

Denne artikkelen gjennomgår grunnprinsippene for utforming av regnbed basert på internasjonale og norske erfaringer: Plassering av anlegg, beregning av størrelse, krav til stedefgen jord eller innsetting av nytt filtermedium, prinsipper for valg av vegetasjon og vedlikehold. Regnbed er et meget populært tiltak i andre land, men er foreløpig lite benyttet i Norge. Denne artikkelen gir råd for utforming slik at regnbed-teknologien kan bli et attraktivt alternativ ved disponering av overvann i norske byer og tettsteder.

### Innledning

Et regnbed er et LOD-tiltak (Lokal Overvanns-Disponering), der hovedhensikten er å holde overvann tilbake helt eller midlertidig. Overvann kan komme fra hustak, gårdsplasser, P-areal og veier. Anlegget er utformet som en forsinking i terrenget der vann holdes tilbake på regnbed-overflaten før det infiltrerer ned gjennom ett filtermedium. Et regnbed er ikke en transportvei for overvann (som f. eks. en vadi, en gresskledd forsinking), har ikke et permanent vannspeil (som en våtmark), og har et rikt vegetativt arts-mangfold. Figur 1 viser generell oppbyggingen av et regnbed.

Etter at begrepet regnbed (eng. *Raingardens* og *bioretention*) oppstod i Prince George County i Maryland, USA på slutten av 80-tallet har det



Figur 1. Regnbed på leirjord, med utskiftet filtermedium og drenering.

i dag blitt et meget populært tiltak for håndtering av overvann i USA, Canada og Australia. Eksempelvis har byer i USA og Australia som mål å anlegge 10 000 regnbed (Melbourne Water Corporation 2009, SPAWN 2010). Den omfattende anvendelsen begrunnes i regnbedets evne til å redusere flomtoppbelastning til aldrende avløpssystem, la seg ettermontere i nedbørfelt med overvannsutfordringer, bevare vannet i det urbane miljøet og beskytte vannforekomster ved å tilbakeholde forurensninger fra overvannet. I tillegg vil regnbed øke biodiversiteten, forbedre og forsterke grønnstrukturen og opplevelsen av byen, beskytte urbane vassdrag mot erosjon, etterfylle grunnvannet og ikke minst; involvere befolkningen i løsningsrettet adferd. Erfaringer fra case studier i USA viser at regnbed generelt er økonomisk besparende sammenliknet med konvensjonelle tiltak for overvannshåndtering (PGC 2007).

Det er imidlertid også utfordringer med regnbed: Anleggene er arealkrevende sammenliknet med andre tiltak. Hvis stedegne masser er tette må disse skiftes og regnbedet dreneres. Regnbed krever vedlikehold. Det aller meste av internasjonal forskning og erfaring på regnbed gjelder for varmere klima enn det vi har i Norge. Noen av de største utfordringene med regnbed i Norge relaterer seg til redusert infiltrasjon som følge av temperatur, frost og is i regnbedet og bruk av sand, grus og vegsilt.

Denne artikkelen omfatter utforming av regnbed i norske forhold og bygger på våre erfaringer fra aktiviteter utført i perioden 2006 til

2013. Aktivitetene omfatter utforming, anlegging, oppfølging og forsøk ved fire pilot-regnbed i Norge, og veiledning av to masteroppgaver (Dalen 2012, Saksæther og Kihlgren 2012). Våre anbefalinger bygger også på dimensjoneringsmanualer fra Minnesota (MPCA 2008), Wisconsin (WDNR 2006) og Maryland (PGC 2007), USA, og Melbourne, Australia (FAWB 2009). Vi har i tillegg involvert andre personer som vi mener kan bringe regnbed-teknologien videre (se takk-listen). Artikkelen er ikke ment som en fullstendig sammenligning og en endelig anbefaling. Regnbed er et nytt tiltak i Norge og vi forventer at erfaringsgrunnlaget vil øke i kommende år.

Denne artikkelen vil fortrinnsvis fokusere på utforming av regnbed med det formål å håndtere overvannsmengder i Norge. Det er imidlertid viktig å være klar over at regnbed også vil bidra til å rense overvannet. Følgende tema berøres i denne artikkelen: Forhold i nedbørfeltet, valg av størrelse, filtermedium og vegetasjon, vinterdrift, drenering, vedlikehold samt fremtidige forskningsbehov.

## Pilot-regnbed i Norge

I Norge er det anlagt fire pilot-regnbed for forskning og utvikling, tabell 1: Langmyrgrenda 34b (L34b, figur 3) og Nils Bays vei 21 (NB21, figur 4) i Oslo, Hammondsvei 8 (H8, figur 5) i Melhus, og Risvollan borettslag (RIS, figur 8) i Trondheim. Regnbedene med drenering har skiftet ut hele eller deler av stedegen masse med sand og siltig sand, figur 2. Detaljer og ytelse av pilotregn-

Lokaliteter	L34b	NB21	H8	RIS
Etablert	2006	2009	2009	2010
Overflateareal ved fylt regnbed [m <sup>2</sup> ]	5,9	10,3	5,1	40,0
Maksimal vannstand, <i>hmaks</i> [cm]	6,5	20	19	16
Dybde på filtermedium [cm]	Stedegen masse	80	100	75
<i>Kh</i> [m/t] <sup>a</sup>	0,36	0,37	0,08	0,05
Filtersammensetning	Stedegen masse; morene	Ca 50 % sand, 45 % Oslo kompost <sup>®</sup> , 5 % stedegen toppjord	20 cm topplag av sandjord / mellomag med tilbakefylt stedegen masse	Ca 70 % sand, 25 % løvkompost fra Forseth Grus AS, 5 % stedegen toppjord
Leir	8 %	6 %	1 % / 16 %	3 %
Silt	23 %	17 %	12 % / 62 %	21 %
Sand	69 %	77 %	87 % / 22 %	75 %
Organisk materiale	8 %	8 %	Ikke målt	4 %
Drensrør	Udrenert	100 mm, strupet utløp	100 mm	2 x 100 mm
Overflate på nedbørsfelt	Asfalt, grus og gress	Tak	Tak	Asfalt og gress
Areal nedbørsfelt [m <sup>2</sup> ]	291	139	107	8 300

<sup>a</sup> hydraulisk konduktivitet ble målt med MPD sommeren 2012 (L34b, NB21, RIS) og syntetisk regn-test sommeren 2011 (H8).

*Tabell 1. Detaljer på norske pilot-regnbed, tilknyttede nedbørsfelt og filtermediets sammensetning og egenskaper. Prinsipp tegninger er vist i figur 2. Lokalitetenes plassering er forklart i teksten.*

bedene er beskrevet i masteroppgavene nevnt over og i Vann-artikler Braskerud m.fl. (2012) for L34b, NB21 og H8, og Dalen m.fl. (2012) for RIS. En fotokavalkade som viser anleggingen av pilot-regnbedene er presentert av Braskerud, m.fl. (2013).

## Nedbørfeltet

### Nedbørfeltets størrelse

Regnbed er et tiltak som er spesielt egnet for små nedbørfelt. Basert på retningslinjer fra USA, anbefaler vi at nedbørfeltet ikke overstiger 0,8 ha. Store nedbørfelt vil kunne medføre høy vannføring på overvannet og dermed øke risikoen for erosjon, samt øke risikoen for stående vann og medfølgende myggetviking. Store nedbørfelt kan deles i mindre enheter ved å anlegge flere regnbed. Hvis tilførslene av vann er mer kontinuerlig, vil andre tiltak som f.eks. fangdammer/

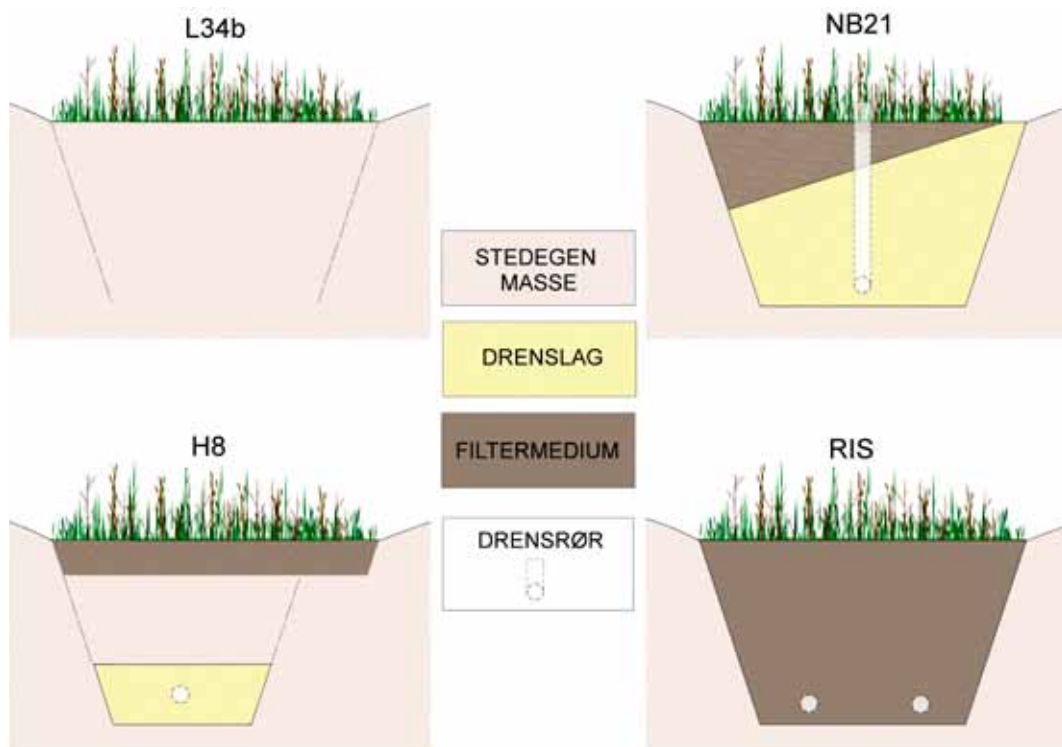
konstruerte våtmarker være mer egnet (Braskerud 2002).

### Lokalisering

Regnbed kan anlegges langs veger, ved P-areal, tette urbane områder, som en del av en park, i hager, ved nybygg eller etter-monteres ved rehabiliteringsprosjekt. Kartlegging av topografi og vannveier er nødvendig for å finne egnet lokalitet for regnbedet. Ettersom regnbed ikke har som formål å håndtere alle nedbørshendelser er det viktig å planlegge trygge flomveier. Regnbedet bør ikke plasseres i skyggen av trær da dette vil kunne hemme vegetasjonsutviklingen.

### Avstand til bygg

Regnbed må plasseres med avstand til bygg med kjeller for å unngå risiko for vannskader på



Figur 2. Prinsskisse av pilot-regnbedene. Forskjellig oppbygning av filteret er testet i forsøkene.

bygningsmasse under bakkenivå. I USA anbefales minst 8 m fra kjellere og 1,5 m fra bygningsfundamenter (PGC 2007). Vi har ingen spesifikke avstands anbefalinger, kun at vann som infiltrerer anlegget ikke må skade bygningsmasse under bakkenivå. Der regnbedene er drenert vil man ha god kontroll på vannet. På selvdrenerende grunn må en vise ekstra aktsomhet, fordi vannet kan følge sprekkesystemer i grunnen som ikke er kjent, figur 3.

### Terrengets helning

Det anbefales at helningen på terrenget i nær tilknytning til regnbedet er relativt slak (5 %) og under 20 % (PGC 2007). Stor helning medfører høy vannhastigheten som øker risikoen for erosjon i regnbedet. I bratt terreng er det mulig å bygge regnbedet i trinn/etasjer. Ved slik utforming er det viktig å være bevisst at vegetasjonen vil motta ulik mengde vann, avhengig av avstanden til innløpet. Helningen på regnbedoverflaten bør være noenlunde plan.

### Grunnforhold

Infiltrasjonsegenskapene i grunnen avgjør om regnbedet må dreneres og om stedegne masser kan benyttes som filtermedium. Leirjord er uegnet for infiltrasjon og regnbed som etableres på dette må alltid dreneres. Hvis jorda er leirfattig kan infiltrasjonsevnen vurderes ved bruk av: i) *Infiltrometer*, der vann tilføres i en nedgravd skumplast-kloss med konstant vannhøyde (Jensen 1990), ii) *spademethoden*, der en grunn grop graves ut, vann fylles i og hastigheten vannstanden synker måles, og iii) *MPD-metoden* som er utviklet spesielt mht. regnbed (eng.: *Modified Philip Dunne Infiltrometer*). MPD tester infiltrasjonen raskt på flere steder med relativt lite utstyr (Braskerud og Paus 2013).

### Kilder til forurensning i nedbørsfeltet

Ved anleggning av regnbed må den forventede overvannskvaliteten og mulige kilder til forurensningen i nedbørsfeltet vurderes sammen med kvalitet på nedstrøms vannforekomst. Regnbed





Figur 3. L34b ble plassert svært nær en garasje. Det har ikke gitt problemer fordi infiltrasjonen er meget god.

er generelt godt egnet til å håndtere første avrenning etter nedbør (first-flush) og vil kunne tilbakeholde mye forurensninger fra overvannet. For ytterligere informasjon om renseprosesser og tilbakeholdelse av ulike typer forurensing henvises det til Muthanna (2007) og til litteraturgjennomgang av Davis m.fl. (2009) og videre referanser der.

I Norge vil regnbed i tillegg kunne være tilknyttet arealer der vegsalt (NaCl) benyttes. Det er usikkert hvordan NaCl virker inn på prosesser i regnbed men potensielle negative effekter inkluderer svekking av vegetasjon (Amundsen m.fl. 2008), mobilisering av tidligere tilbakeholdte tungmetaller fra filtermediet (Amrhein m.fl. 1992, Norrström 2005) samt endringer i jordstruktur med påfølgende reduksjon i infiltrasjonskapasitet (Kakuturu og Clark 2012).

### Dimensjonering av regnbed

Norsk vann (Lindholm m.fl. 2008) anbefaler bruk av *3-leddsstrategien* for håndtering av overvann: 1) Fang opp og infiltrer alle mindre nedbørmengder, 2) forsink og fordøy større nedbørmengder, og 3) sikre trygge flomveger for store nedbørmengder. Verdier og varighetene på nedbørmengdene innen hvert punkt må vurderes lokalt. Regnbed er spesielt egnet for håndtering av vann i punkt 1 og 2. I hvilken grad regnbedet kommer inn i punkt 1 eller 2 avhenger av regnbedets overflateareal, den maksimale vannstanden på overflaten og filtermediets infiltrasjonskapasitet.

### Bestemmelse av regnbedets overflateareal

Generelle retningslinjer anbefaler at regnbedets overflateareal bør være 5 til 10 % av nedbørfeltets areal (MPCA 2008). Dette forholdet regnes å være konservativt, og i noen tilfeller ønsker en å

dimensjonere regnbedet med hensyn til spesi-  
fikke krav, f.eks. i forhold til 3-leddsstrategien.  
Ved å anta at nedbøren faller med relativt kon-  
stant intensitet over en gitt varighet er det mulig  
å gjøre følgende betraktning:

Det totale vannvolum et regnbed kan hånd-  
tere tilsvare summen av vannvolumene som  
kan (i) lagres på overflaten og (ii) som har rukket  
å infiltrere i løpet av nedbørens varighet. For en  
nedbørmengde som faller med en konstant  
intensitet over en gitt regnvarighet, kan man ved  
å benytte denne sammenhengen, beregne nød-  
vendig størrelse på overflatearealet som:

$$A_{\text{regnbed}} = A_{\text{felt}} \times c \times P / (h_{\text{maks}} + K_h \times t_r) \quad (1)$$

Der:

$A_{\text{regnbed}}$  er regnbedets overflateareal (m<sup>2</sup>)

$A_{\text{felt}}$  er nedbørfeltets størrelse (m<sup>2</sup>)

$c$  er nedbørfeltets gjennomsnittlige avrenningskoeffisient (-)

$P$  er dimensjonerende nedbørmengde (m)

$h_{\text{maks}}$  er den maksimale vannstanden på overflaten før vannet  
går i overløp (m)

$K_h$  er filtermediets mettede hydrauliske konduktivitet (m/t)

$t_r$  er dimensjonerende varighet på tilrenningen til regnbedet (t)

I små nedbørsfelt vil  $t_r$  tilsvare regnvarig-  
heten da tidsforskyvningen mellom nedbør og  
avrenning er liten. Ved å bruke formel (1) kan en  
beregne regnbedets overflateareal gitt verdier av  
 $P$  og  $t_r$  som bestemmes i forhold til mål i 3-ledds-  
strategien. Også andre krav til fordøyning som  
f.eks. ønske om å håndtere 100 % av overvanns-  
mengden fra regntilfeller med et bestemt gjen-  
taksintervall kan benyttes som grunnlag for valg  
av  $P$  og  $t_r$ .

Verdien av  $h_{\text{maks}}$  vil ha spesielt stor betydning  
for regnbedets evne til å håndtere vann ved høye  
nedbørintensiteter og i tilfeller der infiltrasjons-  
kapasiteten er redusert. Vi observerte f.eks. at  
NB21 hadde god ytelse om vinteren pga. stor  
 $h_{\text{maks}}$  (Braskerud m.fl. 2012).  $h_{\text{maks}}$  settes nor-  
malt mellom 15 til 30 cm. Filtermediets mettede  
hydrauliske konduktivitet ( $K_h$ ) er ett mål på  
filtermediets infiltrasjonskapasitet og vil ha  
betydning for regnbedets evne til å klargjøre seg

til neste nedbørshendelse samt håndtering av  
langvarige nedbørshendelser. Ved valg av  $K_h$  bør  
en benytte tidligere rapporterte verdier fra felt  
(f.eks. tabell 1). Vår erfaring er at målinger utført  
på laboratoriet sjelden er representative.

En konservativ metode som ofte blir benyttet  
for bestemmelse av  $A_{\text{regnbed}}$  er å se bort fra  
bidraget fra infiltrasjon i formel 1. I dette tilfelle  
vil det nødvendige overflatearealet kun bestem-  
mes ut fra lagringsvolumet på overflaten. Der det  
er kamp om arealene vil det være mulig å  
benytte formel 1 for bestemmelse av  $A_{\text{regnbed}}$ .  
Ønsker man eksempelvis å dimensjonere ett  
regnbed for en nedbørmengde 20 mm (0,02 m)  
som faller med konstant intensitet 2 timer, gitt  
andre karakteristika ( $h_{\text{maks}} = 0,20$  m,  $K_h = 0,10$   
m/t og  $c = 1$ ), vil ved bruk av formel 1 forholdet  
 $A_{\text{regnbed}}/A_{\text{felt}}$  bli 5 %. Ved å ignorere bidraget fra  
infiltrasjon vil det samme forholdet bli 10 %. Da  
vil regnbedet fange opp alt vann uavhengig av  
intensiteten.

Fordi alle regnbed, uansett størrelse, vil bidra  
til å redusere overflateavrenning, vil regnbed  
med mindre  $A_{\text{regnbed}}/A_{\text{felt}}$ -forhold enn over-  
nevnte anbefalinger også gi effekt på nedbøren.  
I tilfeller der det er behov for å bestemme den  
hydrologiske ytelsen til regnbedet mer detaljert  
er dette mulig ved å bruke gratismodeller som  
RECARGA (WDNR 2012).

## Design av regnbed

En av de viktigste årsakene til at regnbed har blitt  
populært i USA er deres estetiske kvalitet hvis  
slike hensyn er tatt ved utførelsen. Bruk av land-  
skapsarkitekt kan være fordelaktig, både med  
hensyn til plassering i nedbørsfeltet og for anleg-  
gets geometriske form og plantevalg.

### Innløp

Vannhastigheten inn i regnbedet må være minst  
mulig for å unngå erosjon. Dette kan oppnås ved  
å bruke steiner i innløpet som energidreperer,  
figur 3. Steiner vil ofte også være et dekorativt  
element. Faller vannet fra rør eller terreng ned i  
anlegget, kan en skiferhelle plasseres ved innløpet  
for å hindre erosjon, figur 4. I våre pilot-regnbed  
har vi benyttet skiferheller med godt resultat.

I Norge vil regnbed kunne være tilknyttet arealer der store mengder sand og grus benyttes på vinterstid. Høy partikkeltransport inn i regnbedet kan bidra til å tette filtermediet over tid. For å redusere risikoen for gjentetting, og lette vedlikeholdet, anbefales det å bygge et lite sedimentasjonskammer i regnbedets innløp. Samme effekt vil oppnås ved også å anlegge en gresskledd forsenkning (vannveg eller vadi) som leder vannet fra nedbørsfeltet inn i regnbedet. Begge disse løsningene har blitt benyttet på RIS der en over 10 m lang vadi leder vannet til ett sedimentasjonskammer på ca. 1 m<sup>2</sup> før vannet når den vegetasjonsdekkede overflata, figur 8.

### Overløp

Det er mulig å øke regnbedets fordrøyningseffekt ved å bruke ett V-formet overløpsprofil. Vannmengdene over overløpsprofilen vil stige til et nivå som tilsvarer tilførselsmengdene. På den

måten vil en oppnå en fordrøyende effekt også for større nedbørshendelser enn det regnbedet er dimensjonert for. Både L34b og RIS har V-overløp av måletekniske årsaker. I ordinære regnbed kan overløpet være steinsatt som i NB21, figur 4. På tilsvarende måte som for innløpet må overløpet beskyttes mot erosjon. Hvis overløpet plasseres med stor avstand fra innløpet vil dette øke vannets oppholdstid på overflaten og dermed fremme sedimentasjon av partikler i overvannet. Når regnbedet er overbelastet, må overvannet ledes trygt videre på sikre flomveger, eller til areal som tåler overskuddsvannet (jf. 3-leddsstrategien).

### Filtermedium

Filtermediet er en viktig bestanddel i regnbedet da dets egenskaper vil påvirke regnbedets evne til å infiltrere vann, bevare fuktighet i tørre perioder, sette vilkår for vegetasjonens vekst, og rense overvannet. Det er spesielt to forhold som er



Figur 4. Ferdig regnbed uten planter (NB21). Vann i innløpet faller på en skiferhelle for å hindre erosjon. Utløpet er sikret med 2 skiferheller i V-form. Nedløpsrør til strupet drenerør øker regnbedets evne til å tilbakeholde overvann.



viktige ved sammensetningen av filtermediet. Det må ha tilstrekkelig høy (i) infiltrasjonskapasitet, eller permeabilitet, for å håndtere overvannet, og (ii) innhold av organisk materiale for å tilrettelegge for vegetasjon og mikrobiologisk aktivitet. Som vist i tabell 1 har vi i våre pilot-regnbed forsøkt ulike sammensetninger og lagdelinger av filtermediene. Filtermediene på L34b, NB21 og RIS er klassifisert som siltig sand etter Sveistrup og Njøs (1984).

### Filtermediets sammensetning

Der grunnen har en tilstrekkelig god infiltrasjonskapasitet (f.eks. over 0,10 m/t) vil de stedegne masser kunne benyttes som filtermedium. Der dette ikke er tilfelle, vil det være nødvendig med hel eller delvis utskifting, installering av drensør, samt tilføring av eksternt filtermedium (figur 5). Det finnes en del litteratur på filtermedium-sammensetninger som ivaretar kravene med hensyn til organisk innhold og infiltrasjonskapasitet. En ofte benyttet sammensetning i

Wisconsin og Minnesota, USA, er å blande sand med kompostert hageavfall og i volum-forholdene 15 til 50 % kompost og 50 til 85 % sand (WDNR 2006, MPCA 2008). Generelt vil infiltrasjonskapasiteten reduseres med mengde kompost som benyttes, og øke med økende mengde sand (Thompson m.fl. 2008). Innblanding av stedegen toppjord (matjord) er også mulig selv der infiltrasjonskapasiteten i de stedegne massene ikke er tilstrekkelig. Da kreves det at toppjorden holder god kvalitet, det vil si har grynstruktur (aggregater), at meitemark trives og at den blandes homogent inn i filtermediet ved bruk av f.eks. gravemaskin. På RIS ble det benyttet stedegen toppjord av leire uten grynstruktur. Innblandingen ble svært vanskelig, fordi toppjorda ikke lot seg finfordele. I NB21 derimot ble det blandet inn 5 % gammel plenjord av leire med god kvalitet, som har fungert utmerket. Generelt bør muligheten for bruk av stedegne masser alltid undersøkes da det vil være økonomisk besparende.



Figur 5. I H8 ble ikke hele filteret skiftet ut, fordi regnbedet ble anlagt manuelt. (foto: R.A. Grande).



### Infiltrasjonskapasitet i filtermediet

I USA er kravet til filtermediets infiltrasjonskapasitet ( $K_h$ ) ofte satt til 0,025 m/t. Dette virker for lavt for norske forhold. Ettersom  $K_h$  ikke bare er en funksjon av filtermediets permeabilitet, men også vannets densitet og viskositet, vil  $K_h$  reduseres ved synkende temperatur. Ved å benytte sammenhengen mellom permeabilitet og  $K_h$  (Hillel 1998), samt tabell-verdier for vannets densitet og viskositet ved ulike temperaturer (Crowe m.fl. 2005), kan en beregne at en  $K_h$  målt ved 22,5 °C vil reduseres med 25 % ved 12 °C, og videre 50 % ved 0 °C. Dette betyr at en langt lavere  $K_h$  enn den som er målt ved romtemperatur vil opptre i felt. På RIS har vi observert at temperaturen i toppen av filtermassen i perioden da den største delen av nedbøren forventes (september og oktober) har ligget på mindre enn 10 °C om lag to tredjedeler av tiden, og lavere enn 5 °C om lag en femtedel av tiden. For å hindre at temperatur ikke er begrenser infiltrasjonskapasiteten i regnbedet anbefaler vi at  $K_h$  i filtermediet bør være minimum 0,10 m/t ved romtemperatur. Dette er i tråd med anbefalte verdier fra Australia (FAWB 2009) og vil gi tilstrekkelig rask drenering av regnbedet gjennom hele året. Målinger fra L34b og NB21 (tabell 1) viser imidlertid at  $K_h$  også kan være langt høyere enn minstekravet på 0,10 m/t samtidig som vegetasjon er godt etablert.

Ut i fra våre erfaringer er det utfordrende å anbefale en bestemt sammensetning av leire, silt og sand som ivaretar en tilstrekkelig stor  $K_h$ . For eksempel har RIS det laveste innholdet av leire, men  $K_h$  er likevel om lag en tiendedel av infiltrasjonskapasitetene for L34b og NB21. En erfaring vi har gjort oss fra infiltrasjonstester utført i regnbed i USA, er at der vegetasjonsdekket er godt etablert vil infiltrasjonen være god. Dette kan ha sammenheng med at planterøtter og de biologiske prosessene som foregår rundt røttene gir en mer porøs jord enn jord uten planter (Rachman m.fl. 2004). Sammenhengen ser også ut til å stemme overens med erfaringene fra de norske regnbedene der RIS har en yngre og lavere plantetetthet enn det L34b og NB21 har. Vår anbefaling er: Ved å vektlegge etablering av

vegetasjon vil regnbedets infiltrasjonskapasitet også ivaretas, under forutsetning av at filtermediet domineres av sand. I tillegg; når filtermediet bygges opp, er det viktig å unngå kompaktering, se nedenfor om oppbygging av filtermediet.

### Frost i filtermediet

I hvilken grad regnbedet er i stand til å håndtere overvann i frosset tilstand avhenger av typen frost som dannes i filtermediet: *Porøs*, eller åpen frost, er en frosttype som dannes når filtermediet fryser med ett lavt vanninnhold. Ved porøs frost er porene fylt med luft og infiltrasjon mulig selv ved minusgrader. *Betongfrost*, eller tett frost, vil dannes når filtermediet fryser i vannmettet tilstand. Infiltrasjon er ikke mulig ved betongfrost og kun overflatevolumet vil være tilgjengelig for vannhåndtering. For å fremme dannelse av porøs frost er det viktig at regnbedet dreneres tilstrekkelig før det vannet fryser, noe som igjen understreker viktigheten av en høy infiltrasjonskapasitet i filtermediet.

Selv om filtermediets infiltrasjonskapasitet er stor, vil det fremdeles kunne dannes et islag på overflaten av regnbedet når dette er dekket med snø. Dette skyldes fryse- og tineprosesser nær jordoverflaten, typisk når det er tele i bakken, som danner en is-linse under snøpakken (French og Binley 2004). Vi har registrert *porøs* frost i pilot-regnbedene før jul (med unntak av H8) og *tett* frost i løpet av vinteren. I NB21 infiltrerte regnbedet når avrenning ble tilført kontrollert i desember, men kun overflatevolumet var tilgjengelig ved tilføring i februar (Braskerud m.fl. 2012).

### Oppbygning av filtermediet

#### Hel og delvis utskifting

Der stedeagne masser ikke har tilstrekkelig infiltrasjonsegenskaper har man to alternative metoder; delvis og hel utskifting. Ved delvis utskifting graves kun en bred grøft for plassering av drenerørret. Dette er aktuelt i store anlegg for å redusere kostnadene, og der gravemaskin ikke er tilgjengelig (H8 ble gravd ut for hånd, figur 5). Hvis man bruker gravemaskin for å skifte ut massene er det trolig lite å spare på ikke å skifte alt i små

regnbed (NB21). Lav  $K_h$  i H8 skyldes at stedegeen masse av siltig leittleire ble tilbakefylt over drens laget i sand (tabell 1 og figur 2). Ved delvis utskifting bør filtermedium uten leirinnhold benyttes som grøttefyll.

### Dybde

Dybden på filtermediet avhenger at grunnforhold, vegetasjonens forventede rot dybde og regnbedets formål. Typiske anbefalte dybder varierer mellom 40 og 80 cm. Dybden vil sammen med  $h_{maks}$  og filtermediets effektive porøsitet bestemme det totale vannvolumet som til en hver tid kan lagres i regnbedet (formel 1). For pilot-regnbedene med utskiftet filtermedium (NB21, H8 og RIS) utgjør filteret om lag halvparten av regnbedets totale vannlagringsvolum. Effektiv utnyttelse av porevolumet forutsetter en tilstrekkelig høy  $K_h$  i filtermediet.

### Lagdeling

Som vist på figur 1 vil filtermediet normalt ha ett underliggende drens lag med dybde  $> 30$  cm. Drens laget består av godt sortert grovere masser og skal hindre tetting av drens røret. Filtermedium og drens lag kan være avskilt med fiberduk (H8 og NB21) men det er usikkert om dette er nødvendig når kornstørrelsen er relativ lik. I designmanualer anbefales det at filtermediet og drens laget er horisontalt lagdelt. Dette er lett vint men kan være sårbart hvis filtermediets egenskaper ikke er optimale. For eksempel, i RIS, der samme filtermedium ble benyttet i hele dybden, figur 2, har vi observert lav  $K_h$  noe som begrenser ytelsen, tabell 1. Et alternativ til en horisontalt lagdeling er å skråstille drens laget slik at det kommer opp i dagen i en del av regnbedet. Dette har blitt gjort på NB21, figur 2. Skråstilling sikrer god infiltrasjon i regnbedet selv om filtermediets  $K_h$  er lav. Som observert på NB21 vil vekstforholdene være dårligere der drens laget går opp i dagen sammenliknet med resten av overflaten. En løsning er derfor å la drens laget gå opp sentralt i regnbedet.

Ved anlegging av filtermedium er det svært viktig å unngå kompaktering fordi dette vil redusere permeabiliteten. Dette skjedde under

anlegging av RIS for å unngå ujevn setning, og er trolig en viktig årsak til lav  $K_h$ . Vekt av mennesker i anleggsperioden, snø og vann vil trolig få regnbedet til å sette seg tilstrekkelig over tid.

## Drenering

### Drens rør

Der stedegeen masser ikke har tilstrekkelig infiltrasjonskapasitet er det nødvendig å drenere regnbedet. Det anbefales å benytte sliiset drens rør med minimum diameter på 100 mm som plasseres i drens laget. Helning på drens røret bør være slik at stående vann ikke vil fryse om vinteren. I våre pilot-anlegg har vi benyttet korrigerete drens rør med diameter 100 mm. Drens rørene er lagt 5 til 10 cm over filterbunnen slik at det ofte står litt vann til vegetasjonen. Ønsker man hydraulisk kontroll på videreførte vannmengder i forhold til bestemte krav (f.eks. maksimalt påslipp på kommunalt nett) kan drens røret strupes, figur 6.



Figur 6. Drens rør i NB21 er strupet for redusert påslipp til kommunalt nett.

### Drens rør brukt til infiltrasjon

Ved styrtregn vil vannføringen inn i regnbedet kunne bli større enn filtermediets infiltrasjonskapasitet. Dette kan medføre at vannet går i overløp før hele regnbedets kapasitet er utnyttet. Dette kan løses ved å la overvann ledes ned i drens røret via et nedløpsrør, og infiltrere filtermediet innenfra. En slik løsning ble valgt på NB21, der vi lot drens røret gå opp til overflaten med avslutning 5 cm under regnbedets overløp, figur 7. Den første meteren av nedløpsrøret var

uten slisser. Rørinnløpet ble lukket med et perforert lokk. I utløpsenden ble drenerør strupet slik at tapet av dreneringsvann ikke kunne overstige ca. 0,6 l/s for påslipp på kommunalt nett, figur 6. Løsningen fungerte utmerket når avrenning ble tilført kontrollert, også om vinteren da overflaten hadde isdekke på ca. 5 cm (Braskerud m.fl. 2012). En annen fordel med drenerør som ender i friluft er at de lett lar seg vedlikeholde.



Figur 7. Nedløpsrør til strupet drenerør i NB21 utnytter porevolumet i filteret når infiltrasjonshastigheten er for lav.

## Vegetasjon Beplantningsstrategier

Det er i prinsippet to beplantningsstrategier for regnbed: (i) Tradisjonelt grøntanlegg og (ii) naturlikt vegetasjonsdesign. Tradisjonelt grøntanlegg består av beplantning med bruk av pryplanter og hageplanter som er skjøtselskrevende. Naturlikt vegetasjonsdesign tar utgangspunkt i den vegetasjon som har tilpasset seg lokale forhold og vil, etter etableringsfasen, kunne fungere som ett selvdrevent system med minimalt vedlikehold. I våre pilot-regnbed er det hovedsakelig brukt pryplanter, fordi det var ønskelig at regnbedende skulle oppleves som et estetisk element i lokalmiljøet, figur 8.

### Artsvalg

Planter som egner seg til bruk i regnbed må tåle vekslende våte og tørre forhold. Planter som trives ligger typisk i sjiktet mellom våtmarksplanter og mer tørkekrevende arter. Valg av arter må bør være tilpasset klimasonen regnbedet ligger i og bruk av stedege arter må vektlegges. Generelt



Figur 8. Beplantning av RIS. Regnbed er artsrike anlegg tilpasset lokalt klima (foto: A. Ekle fra innløpet).

er valgmulighetene mange og det ligger forslag på beplantningsplaner tilgjengelig på internett og i bokform (Shaw og Schmidt 2003, Wallace 2009). Ut i fra erfaringer fra pilot-regnebene vil vi anbefale stauder og flerårige arter. Tradisjonelle våtmarksarter (som f.eks. dunkjevle) fikk ikke tilstrekkelig fuktighet og egnet seg derfor mindre godt.

## Etablering og vedlikehold av vegetasjon

Ved anlegging, og de første årene etter, er det viktig at det legges til rette for at vegetasjonen får etablert seg og dekker overflaten raskest mulig. Vanning i denne perioden er nødvendig ved tørke. I amerikanske design-manualer nevnes det at gjødsling er unødvendig fordi overvann fra utviklede områder trolig vil inneholde tilstrekkelig mengde næringsstoffer. I tilfeller der overvannet er næringsfattig (f.eks. takvann) vil gjødsling imidlertid kunne være nødvendig for å få etablert vegetasjon. I så tilfelle anbefaler vi at næringsstoffbehovet fordeles over vekstsesongen i flere små doser slik at plantene får nyttiggjort seg næringsstoffene best mulig. Generelt ønskes gjødsling minimalisert da dette kan medføre tap av næringsstoffer til vannforekomster.

Videre vedlikehold av vegetasjonen er som for parkområder; vanning i tørre perioder, mekanisk ugrasbekjempelse og mulig gjødsling. Når ønsket vegetasjonen er godt etablert vil det bli mindre plass og lys til ugress og derved mindre vedlikehold. Dette har vi observert på L34b der relativt høye arter er benyttet. I L34b har vi også observert at arter med robust stengel (sverdlilje) vil lage smeltehull i isdekket om våren og dermed fremme infiltrasjonen gjennom islaget. Hvis årets bladmasse fjernes om høsten, bør derfor stengler ikke kuttes lavere enn ca. 5-10 cm.

### Overdekking

I amerikansk litteratur anbefales ofte bruk av bark eller godt omdannet kompost (eng. *mulch*) som et topplag på regnbedet. Det organiske laget skal holde på jordfuktigheten, hindre ugress i å spire og gjøre regnbedet vakkert i periodene vegetasjonen ikke dekker overflaten. Barken må

imidlertid etterfylles ved behov. I tillegg vil store vannmengder kunne omfordele barken. Vi benyttet kun kompost på overflaten av NB21 ved etablering. Ettersom regnbedet er så lite har ikke ugress vært noen utfordring og kompost har dermed ikke blitt etterfylt.

## Forskningsbehov

Selv om erfaringene med regnbed internasjonalt er gode er dette en ny teknologi i Norge. Basert på vår kunnskap ønsker vi å foreslå følgende tema for videre forskning på regnbed i norske forhold:

- Hvilke kriterier for sammensetning av filtermediet bør settes for å oppnå tilstrekkelig infiltrasjonskapasitet samt tilrettelegge for vegetasjon?
- Er fiberduk mellom filtermedium og dremslag nødvendig når disse domineres av sand? Vil fiberduk redusere infiltrasjon og rotutvikling?
- Hvordan kan en mest mulig effektivt tilrettelegge for etablering av vegetasjon?
- Kan utforming, valg av planter, drift og vedlikehold bidra til å redusere formasjonen av isdekke?
- I hvilken grad vil vegetasjon bidra til å redusere effekter av gjentetting og redusert infiltrasjonskapasitet over tid?
- Hvilke effekter vil sand, grus og vegsalt ha i regnbed mht. til infiltrasjonskapasitet?
- Hvordan kommer regnbed ut i forhold effekt, kostnader, vedlikehold og sosial aksept sammenliknet med andre tiltak? Hvordan kan man kostnadseffektivisere anlegging av regnbed?

## Konklusjoner

På bakgrunn av gjennomgangen har vi oppsummert ett forslag til huskeliste ved etablering av regnbed:

1. Kartlegg vannveier for å finne egnet lokalitet. Velg tilstrekkelig avstand til bygninger.
2. Bestem nedbørsfeltets areal, gjennomsnittlig avrenningskoeffisient og dimensjonerende nedbørshendelse (mengde og varighet) iht. mål i 3-leddsstrategien.



3. Bestem maksimale vannhøyde, anta mettet hydraulisk konduktivitet og beregn overflateareal.
4. Vurder om stedeagne masser har tilstrekkelig infiltrasjonskapasitet, eller om nytt filter og drenering må benyttes.
5. Benytt filtermedium med god infiltrasjonskapasitet for effektivt å håndtere overvann gjennom hele året. Vurder skråstilt drensleg og drenerør i kontakt med regnbed-overflate.
6. Gi regnbedet en form der vannet ledes over hele overflaten. Vurder forbehandling for tilbakeholdelse av partikler og søppel.
7. Benytt vegetasjon tilpasset lokalt klima. Vær bevisst på beplantningsstrategi.
8. Vann, gjødsle og fjern ugress til ønsket vegetasjon har etablert seg.
9. Vedlikehold regnbedet etter behov.

## Takk

Arbeidet som er presentert i denne artikkelen er en del av prosjektet ExFlood, finansiert av Norges Forskningsråd. Regnbedene er anlagt med støtte fra EU interreg 4b prosjektet SAWA, i tillegg til Oslo VAV (NB21), Trondheim kommune/Framtidens byer (RIS) og NVE (instrumentering). Takk til våre gode feltverter: Familiene Braskerud og Bugge (L34b), Fremstad (NB21), Grande (H8) og Teknisk avdeling ved Risvollan brl. (RIS). En ekstra takk til Tone Muthanna (NTNU), Trond Mæhlum (Bioforsk), og Erle Stenberg (Link landskap) og Elin T. Sørensen (COWI) og to anonyme fagfellevurderere for kommentarer til manuskriptet.

## Referanser

Amrhein, C., Strong, J. E. og Mosher, P. A. (1992). *Effect of Deicing Salts on Metal and Organic Matter Mobilization in Roadside Soils*. *Environmental Science & Technology*, 26 (4): 703-709.

Amundsen, C. E., French, H., Haaland, S., Pedersen, P. A., Riise, G. og Roseth, R. (2008). *Salt SMART - Miljøkonsekvenser ved salting av veger - en litteraturgjennomgang*, Statens Vegvesen rapport 2535.

Braskerud, B. C. (2002). *Fangdammer/konstruerte våtmarker som et tiltak i restaurering av vassdrag*. *Vann*, 3: 256-259.

Braskerud, B. C., Kihlgren, K. S., Saksæther, V. og Bjerkholt, J. T. (2012). *Hydrologisk testing av regnbed for bruk som LOD-tiltak i småhusbebyggelse*. *Vann*, 4 (47): 490-503.

Braskerud, B. C. og Paus, K. H. (2013). *Anlegging av regnbed. En billedkavalkade over 4 anlagte regnbed*, NVE rapport nr. 3/2013.

Crowe, C. T., Elger, D. F. og Roberson, J. A. (2005). *Engineering Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, (8th edition),

Dalen, T. (2012). *Hydrologisk dimensjonering av regnbed i kaldt klima*. Masteroppgave, NTNU.

Dalen, T., Paus, K. H., Braskerud, B. C. og Thorolfsson, S. T. (2012). *Målt og modellert hydrologisk ytelse til regnbed i Trondheim*. *Vann*, 3 (47): 328-339.

Davis, A. P., Hunt, W. F., Traver, R. G. og Clar, M. (2009). *Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs*. *Journal of Environmental Engineering*, 135 (3): 109-117.

Facility for Advancing Water Biofiltration (FAWB) (2009). *Stormwater Bioinfiltration Systems. Adsorption Guidelines*. Melbourne, Australia.

French, H. og Binley, A. (2004). *Snowmelt Infiltration: Monitoring Temporal and Spatial Variability using Time-lapse Electrical Resistivity*. *Journal of Hydrology*, 297 (1-4): 174-186.

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, USA.

Jensen, P. D. (1990). *Methods for Measuring the Saturated Hydraulic Conductivity of Tills*. *Nordic Hydrology*, 21 (2): 95-106.

Kakuturu, S. og Clark, S. E. (2012). *Impacts of Deicing Salts on Soil Structure and Infiltration Rate*. 9th Urban Watershed Management Symposium, Albuquerque, New Mexico, USA. May 20-24, 2012.

Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægvog, S., Jakobsen, G. og Aaby, L. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*, Norsk Vann rapport, 162/2008.

Melbourne Water Corporation (2009). *Healthy Waterways Raingardens. Be part of building 10,000 raingardens to help your local waterways.*, Melbourne Water's 10,000 Raingardens Program, Melbourne, Australia.

Minnesota Pollution Control Agency (MPCA) (2008). *Minnesota Stormwater Manual*. St. Paul, Minnesota, USA.

- Muthanna, T. M. (2007). *Bioretention as a Sustainable Stormwater Management Option in Cold Climate*. Dr.gradsavhandling, NTNU.
- Norrström, C. (2005). *Metal Mobility by De-icing salt From an Infiltration Trench for Highway Runoff*. Applied Geochemistry, 20 (10): 1907-1919.
- Prince George's County (PGC) (2007). *Bioretention Manual*. Environmental Service Division. Department of Environmental Resources, Maryland, USA.
- Rachman, A., Anderson, S. H., Gantzer, C. J. og Thompson, A. L. (2004). *Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration*. Soil Science Society of America Journal, 68 (6): 2000-2006.
- Saksæther, V. og Kihlgren, K. S. (2012). *Regnbed som tiltak for overvannshåndtering i småhusbebyggelse*. M.Sc. Thesis, Institutt for matematiske realfag og teknologi, Universitet for miljø- og biovitenskap.
- Shaw, D. og Schmidt, R. (2003). *Stormwater Design: Species Selection for the Upper Midwest*, Minnesota Pollution Control Agency, St.Paul, Minnesota, USA.
- SPAWN (2010). *10,000 Rain Gardens Project 2010*, Report to the Marin Municipal Water District, Salmon Protection and Watershed Network.
- Sveistrup, T. og Njøs, A. (1984). *Kornstørrelser i mineraljord, Revidert forslag til klassifisering*. Jord og myr, 8: 8-15.
- Thompson, A. M., Paula, C. og Balster, N. J. (2008). *Physical and Hydraulic Properties of Engineered Soil Media for Bioretention Basins*. Transactions of the ASABE, 51 (2): 499-514.
- Wallace, T. (2009). *The Rain Garden Planner*. Schiffer Publishing Ltd,
- Wisconsin Department of Natural Resources (WDNR) (2006). *Conservation Practice Standard 1004: Bioretention for infiltration*. Wisconsin, USA.
- Wisconsin Department of Natural Resources (WDNR) (2012). *Recarga Model v. 2.3 - Infiltration Basins, Bioretention Devices*. <http://dnr.wi.gov/topic/stormwater/standards/recarga.html> (01.01.2013).