

# Vurdering af infiltrationsfaskine teknologier: Felt forsøg og model beregninger







## Resume

Byer består hovedsagligt af impermeable flader, der forhindrer den naturlige nedsivning af regnvand, dermed skal regnvandet afskaffes på andet vis. Traditionelt ledes regnvandet i kloakken, men dette medfører store økonomiske og miljømæssige negative konsekvenser. En lokal håndtering af regnvand, som f.eks. ved nedsivning fra faskiner eller ved regnhaver kan være et mere bæredygtigt alternativ. I dette projekt undersøgtes en 4 m<sup>3</sup> stor faskine ved EnergyFlexHouse (EFH) i Københavnsområdet. Faskiners effektivitet er i høj grad afhængig af de omgivende forhold. Formålet med projektet var at øge forståelsen for, hvordan faskiner fungerer i områder med leret jordbund og højt grundvandsspejl.

Faskinen blev anlagt i 2009 og har overløb til en regnhave. Der blev i perioden 10. december 2009 til og med 10. juli 2010 monitoreret vandstand i faskinen, flow ved indløbet og overløbet til faskinen, grundvandstand 0,5 (G0.5) og 2 (G2.0) meter væk fra faskinen, samt nedbør. På baggrund af disse data, feltarbejde og en massebalance blev der lavet en matematisk model af faskinen.

Verificeringen af de monitorerede data viste en meget god sammenhæng mellem regnmåleren ved EFH og Spildevandskomiteens regnmålere ( $R^2 = 0,995$  og  $0,979$ ). Flowmålerne derimod virker ustabile og dele af resultaterne, specielt fra flowmåleren ved overløbet blev vurderet til at være meget upålidelige. Flowmåleren ved indløbet, viser dog ved den simple afstrømningsmodel ( $Q=C$  i A,  $C=0,91$ ) for 1. maj til 10. juli en meget god sammenhæng med regnmåleren ( $R^2=0,98$ ).

Vandstanden i faskinen har gennem hele perioden været meget høj, den laveste vandstand observeret svarer til 75 % af dens kapacitet. Grundvandstanden omkring faskinen er også relativt høj, i hele perioden omtrent med faskinens bund. Der er registreret en konstant hydraulisk gradient ud af faskinen, til G0.5 og G2.0 i faskinens ene ende. Vandniveauerne viser lange perioder, hvor et faldende vandspejl var forventet, da der hverken er registreret et flow ved indløbet eller overløbet, hvor vandspejlet tilnærmelsesvis står stille.

Den mættede hydrauliske ledningsevne for jorden omkring faskinen blev estimeret til  $K_{s1}=3,0*10^{-8}$  m/s (bund og sider) på baggrund af målinger med permeameteret samt kalibrering til de monitorerede data og  $K_{s2}=-4,4*10^{-6}$  m/s (bund) og  $3,0*10^{-6}$  m/s (sider) på baggrund af en analyse af vandspejlssænkningen i faskinen. I gennemsnit passede modelleringer med  $K_{s1}$  bedst til data. Modelleringer med  $K_{s2}$  passede bedst i de perioder, hvor der observeredes et fald i vandspejlet.

Resultaterne af modelleringerne gav for  $K_{s1}$  gentagelsesperioden,  $T=0,007$  og for  $K_{s2}$   $T=0,016$  for overløb fra faskinen. Dette er væsentligt lavere end den dimensionerede  $T=0,1$ . Overløbsvolumenen var i perioden for  $K_{s1}$  og  $K_{s2}$  på henholdsvis 92 % og 68 % af det vandvolumen der gik ud af faskinen. Som konsekvens vil regnhaven i snit være noget mere fyldt en planlagt. Dens kapacitet er dog meget langt fra at overskrides, og et CDS-regn med  $T=10$  år ville kun give en 18 % fyldt regnhave. Resultaterne viser, at faskinen påvirkes i sin funktion, muligvis af det høje grundvandsspejl eller af andre meget lokale forhold, og derfor er nedsivningen af regnvand ikke er særlig effektiv. Alligevel, på grund af regnhaven, bliver 100 % af regnvandet ved EFH håndteret lokalt, og der er ingen belastning af kloaksystemet.



## Abstract

Cities consist mainly of impermeable surfaces, which hinder the natural infiltration of rainwater, and the water must therefore be taken care of. The conventional solution is to lead storm-water into the sewage, but this has both negative environmental and economical consequences. Taking care of storm-water locally, e.g. by soakaways or raingardens could be a more sustainable alternative. This project investigated a 4m<sup>3</sup> soakaway by EnergyFlexHouse (EFH) near Copenhagen. Soakaways efficiency is highly dependent of their surroundings conditions. The objective of this project was to increase the understanding of sokaways in surroundings where the hydraulic conductivity is low and the groundwater level is high.

The soakaway was constructed in 2009 and has an overflow pipe to a raingarden. Water level, inflow, overflow, precipitation and groundwater levels 0,5 and 2,0 meters away from the soakaway was monitored from 10. December 2009 to 10 July 2010. Based on this data, field work and a massbalance, a mathematic model of the system was created.

Verification of the monitored data showed a good correlation between the rain gauge and Danish Waste Water Committees rain gauges close by ( $R^2 = 0,995$  and  $0,979$ ). The flow measurements seemed unstable and parts of the data, especially from the overflow seemed highly unreliable. The inflow measurements shows by a simple run-off model ( $Q=C \cdot A$ ,  $C=0,91$ ) from 1 May to 10 July, good correlation with the rain gauge ( $R^2=0,98$ ).

Through the whole period there was a high water level in the soakaway, the lowest registered level was 75% of its capacity. Groundwater levels are also generally high, approximately on level with the bottom of the soakaway. There is a constant hydraulic gradient from the soakaway to the groundwater 0,5 and 2,0 meters away from the soakaway. Water levels show long periods, where a falling water level would be expected, due to neither inflow nor overflow, but where the water level is more or less stable.

The saturated hydraulic conductivity for the surrounding soil was estimated to  $K_{s1}=3,0 \cdot 10^{-8}$  m/s (bottom and sides) based on measurements with a permeameter and calibrated to monitored data, and  $K_{s2} = -4,4 \cdot 10^{-6}$  m/s (bottom) and  $3,0 \cdot 10^{-6}$  m/s(sides) based on analysis of monitored falls in water level. In average the modeling with  $K_{s1}$  fit the data best, but modeling with  $K_{s2}$  fits the data best in the periods where a falling water level is registered.

The modeling resulted in a return period for overflows,  $T_r=0,007$  with  $K_{s1}$  and  $0,016$  with  $K_{s2}$ . Both are significant lower than the dimensioned  $T=0,1$ . Overflow volume was, of the volume that left the soakaway, 92% and 68% for  $K_{s1}$  and  $K_{s2}$  respectively. As a consequence the raingarden will in average be filled with more water than planned. The raingarden's capacity is still far from overload and a CDS rain with a  $T=10$  would only result in a 18 % filled raingarden. Results show that, possibly due to high ground water levels or other local conditions, the performance of the soakaway is influenced and infiltration is not very efficient. However, because of the raingarden, 100% of the storm-water at EFH is managed on site and there is no load of the sewage system.



## Forord

Denne opgave er et Bachelorprojekt skrevet på DTU Miljø; Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Vand og Miljøteknologi. Opgaven er skrevet i perioden 1 marts til 1 august 2010, og svarer til 15 ECTS point.

Projektet er skrevet i forbindelse med Ph.D.-projektet 'Integrated modeling of sustainable urban drainage systems', der udføres af Maria K. Bergman ved DTU Miljø. Faskinen ved EFH er desuden en del af et samarbejdsprojekt mellem DTU, Dansk Hydraulisk Institut (DHI) og Teknologisk Institut (TI).

Jeg vil gerne takke mine to vejledere, Philip John Binning og Peter Steen Mikkelsen, for inspiration, støtte og vejledning gennem hele processen.

Nils Henrik Eisum fra DHI har også været til stor hjælp til at forstå hvordan målerudstyret fungerede, og til hvad mulighederne var når det ikke fungerede. Han har altid været tilgængelig når det var brug for det, og var desuden med ved EnergyFlexHouse to gange, for at vise opsætningen og løse problemer med målerudstyret.

En stor tak til Thomas Grønkjær for at været chauffør og assistent en dag til feltarbejdet, og tusind tak til Barbara Kleinlercher for at være en god sparringspartner og til inspiration.

Tak til Hector Osvaldo Ampuero Diaz fra DTU Miljø for hjælp i laboratoriet en hel dag til undersøgelse af, hvad der var galt permeameteret, Susanne Kruse fra DTU Miljø for hjælp til forberedelse af feltarbejdet, Bent Skov fra DTU miljø for instruktioner i pejling og landmåling, Karsten Arnbjerg-Nielsen fra DTU miljø for regndata fra Spildevandskomiteen, Søren Gabriel fra Orbicon til at finde baggrundsinformation til nedsivningskort, Ulrik Hindsberger fra Teknologisk Institut for bidraget til vurdering af faskinens dimensioner og Maria K. Bergman fra DTU Miljø for detaljer omkring projektet og permeameteret.

Til sidst vil jeg give en stor tak til Kristine Duelund Vilsgaard for den sidste sproglige Norsk-Danske gennemlæsning.

Kgs. Lyngby 1 august 2010

Marie Rødsten Sagen, s072342





## Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	3
2	Formål.....	7
3	Baggrund og teori.....	9
3.1	Hydrologisk baggrund.....	9
3.1.1	Massebalance.....	9
3.1.2	Afstrømningsmodel.....	10
3.1.3	Vands strømning i jord.....	10
3.1.4	Dimensionsgivende nedbør.....	13
3.2	Om faskiner.....	14
3.2.1	Jord og grundvand.....	14
3.2.2	Dimensionering af faskiner.....	16
3.2.3	Om faskiner ved lignende forhold.....	18
3.3	Case: EnergyFlexHouse.....	20
3.3.1	Jordbundsforhold og grundvandstand.....	21
3.3.2	Regnhaven.....	22
3.3.3	Dimensioneringen af faskine nr. 3.....	23
3.3.4	Online monitoreringsudstyr.....	24
4	Metode.....	27
4.1	Feltarbejde.....	27
4.1.1	Permeameteret.....	27
4.1.2	Pejling og nivellering.....	29
4.2	Matematisk modellering.....	29
4.2.1	Massebalancemodellen.....	30
4.2.2	Sænkingsmodel.....	31
4.2.3	Faskinens kapacitet.....	31
5	Resultater og diskussion.....	33
5.1	Verificering af data.....	33
5.1.1	Vandniveau.....	33
5.1.2	Nedbør.....	34

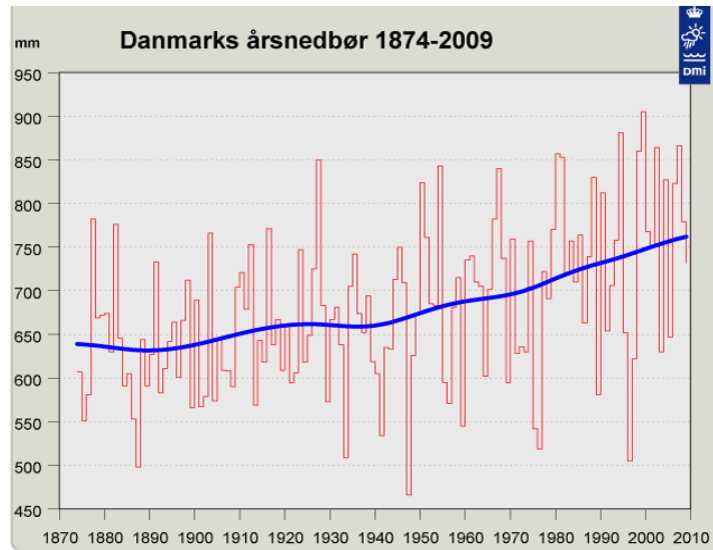
5.1.3	Flow .....	36
5.2	Behandling og udvælgelse af data.....	38
5.2.1	Nedbørsdata .....	38
5.2.2	Flowdata .....	38
5.2.3	Vandniveaudata.....	38
5.2.4	Manglende data.....	39
5.3	Overblik over online monitorerede data.....	39
5.3.1	Vandniveauer.....	39
5.3.2	Flowmålere .....	40
5.3.3	Udvælgelse af data .....	42
5.3.4	Overblik over udvalgte periode.....	42
5.4	Afstrømningskoefficient .....	44
5.5	Hydrauliske gradienter .....	44
5.6	Hydraulisk ledningsevne.....	46
5.6.1	Permeameter.....	46
5.6.2	Sænkingsmodel .....	47
5.6.3	Kalibrering.....	49
5.7	Massebalance model.....	50
5.7.1	Ks1 .....	50
5.7.2	Ks2 .....	52
5.7.3	Vandvolumener og kontrol af modellen .....	54
5.8	Gentagelsesperiode.....	55
5.9	Overløb til Regnhaven .....	56
5.10	Faskinens kapacitet .....	59
5.11	Perspektivering.....	62
6	Konklusion .....	65
7	Kilder.....	68

## 1 Indledning

Byer er årsagen til mange af dagens miljøproblemer, og en stadig øgende urbanisering og befolkningsvækst har gjort disse udfordringer større og større. Et af disse problemer er, at byer i stor grad består af impermeable flader, så som veje og tage, der gør at regnvand ikke kan sive ned i jorden. Herved bliver den naturlige hydrologiske cyklus forhindret. Dette leder til en ubalance med to hovedkonsekvenser: den første er stadigt mindskende grundvandressourcer under byerne, noget der medfører lavere vandstand i nærliggende søer og åer, der er afhængige af grundvandtilførsel. Den anden konsekvens, det overskydende regnvand i byerne, er alligevel den mest problematiske (Sieker, 1998; Holman-Dodds et al., 2003; Chocat et al., 2007; Ferguson, 1994; Mikkelsen, 1995). For hvordan skal denne store vandvolumen fjernes?

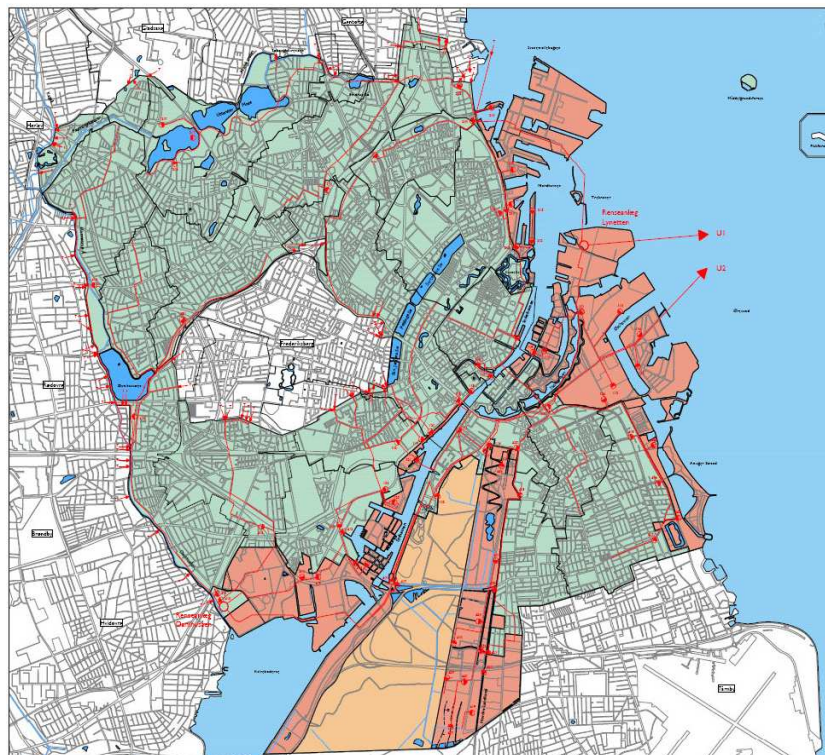
Danmark, som de fleste andre lande, leder i dag regnvandet ned i kloakken. Dette medfører ved store regnskyl en overbelastning af kloaknet og rensningsanlæg. Dette kan føre til oversvømmede kloakker, noget der indebærer store skader både økonomisk, miljø- og sundhedsmæssigt (Holman-Dodds et al., 2003; Chocat et al., 2007). Behandling af regnvand på linje med spildevandet på rensningsanlægget er desuden unødvendigt og energikrævende (Ferguson, 1994). Løsningen på dette problem har blandt andet i Danmark været at have separat kloaknet for regnvand og spildevand, der leder regnvandet direkte til nærliggende vådområder (Mikkelsen et al., 2002). Det har desværre vist sig, at de pågældende vådområder med tiden bliver forurenet, da regnvandet indeholder store mængder urenheder, det har skyllet med sig fra byen (Ferguson, 1994; Chocat et al., 2007).

Et andet problem for regnvandsafledningen i byer er, at kloaknettene er gamle og har brug for renovering, en renovering der er enormt kostbar (Ferguson, 1994, ingeniøren, 2009a). I tillæg har der været en jævn stigning i nedbørsmængden i Danmark siden kloaknettet blev bygget, se Figur 1, noget der har medført hyppigere oversvømmede kloakker. En yderligere stigning i nedbørsmængden sammen med hyppigheden af ekstremnedbør forventes at stige de kommende år på grund af klimaforandringerne (Arnbjerg-Nielsen, 2008; Solomon et al., 2007).



Figur 1, Danmarks årsnedbør 1874-2009. Den blå kurve viser 9 års Gaussfilterede værdier. (Dmi, 2009)

I København er de fleste områder fælleskloakerede i dag med kun få undtagelser (se Figur 2). For at undgå overløb, og da regnvandshåndtering er en stor del af klimatilpasningen, forsøger kommunen at finde metoder at håndtere de forventede ekstra 30 % nedbør (ingeniøren, 2009b).



Figur 2, Kort over Københavns kommune der viser fælleskloakerede områder (røde) og områder med separat kloak for spildevand og regnvand (grøn). Orange områder er fritidsområder. Det ses at omtrent alle boligområder på nær Ørestaden er fælleskloakeret. (Københavns kommune, å.u.)

Alt i alt er der et behov for nytænkning indenfor dagens regnvandsafledning i byerne for at gøre den mere bæredygtig. Med bæredygtig regnvandsafledning menes her noget, der i størst mulig grad genopretter den naturlige vandbalance i et område, altså den der eksisterede inden byen blev bygget. Dette skal ske med et længerevarende perspektiv, samtidig med at økonomiske, sociale, sundhedsmæssige og miljømæssige interesser ivaretages. Regnvand kan i mange tilfælde benyttes som en ressource, eksempelvis til rekreative formål eller til at skabe grundlag for en øget biodiversitet i byerne (Woods-Ballard et al., 2007).

En løsning til bæredygtigt at håndtere regnvand er at håndtere det lokalt (Freni et al., 2009), eller lokal afledning af regnvand (LAR) som det hedder på dansk. Dette gøres ved at opsamle regnvandet der, hvor det falder eller eventuelt fra impermeable flader tæt ved. Det opsamlede regnvand kan så fordampe, nedsive i jorden, benyttes til rekreative formål eller benyttes som erstatning for drikkevand der, hvor en lavere vandkvalitet er acceptabel, f.eks. til toiletskyl og havevanding (Anthonisen et al., 1992), Københavns kommune, 2010). Eksempler på LAR er grønne tage, regnhaver, permeabel belægning og faskiner.

Faskiner er en simpel og billig metode indenfor LAR (Mikkelsen, 1995). En faskine er et nedsivningsanlæg, det vil sige et midlertidigt lagringsted for regnvand i et porøst materiale, der langsomt lader vandet perkolere ned i jorden. Faskiner består oftest af grus eller plastikkassetter, og er gerne gravet ned i jorden for at spare plads (Duchene et al., 1994; Københavns kommune, 2009). Regnvandet ledes som regel ind i et sandfang først for at filtrere grove sedimenter fra faskinen, da sedimenter med tiden vil medføre en tilstopning af bunden (Siriwardene et al., 2007). I Danmark er der også et krav, at alle nye faskiner skal være indpakket i et geotekstil for at forhindre, at forurening fra regnvandet siver ud i jorden (Københavns kommune, 2009a). Faskiner aflaster ikke kun kloaksystem, rensningsanlæg og nærliggende vandløb. Ved nedsivning minimeres eller tilnærmelsesvis elimineres volumen af regnvand, der skal bortskaffes på anden vis. Dermed er faskiner også en LAR teknologi, der ligner meget den naturlige hydrologiske cyklus (Mikkelsen, 1995).

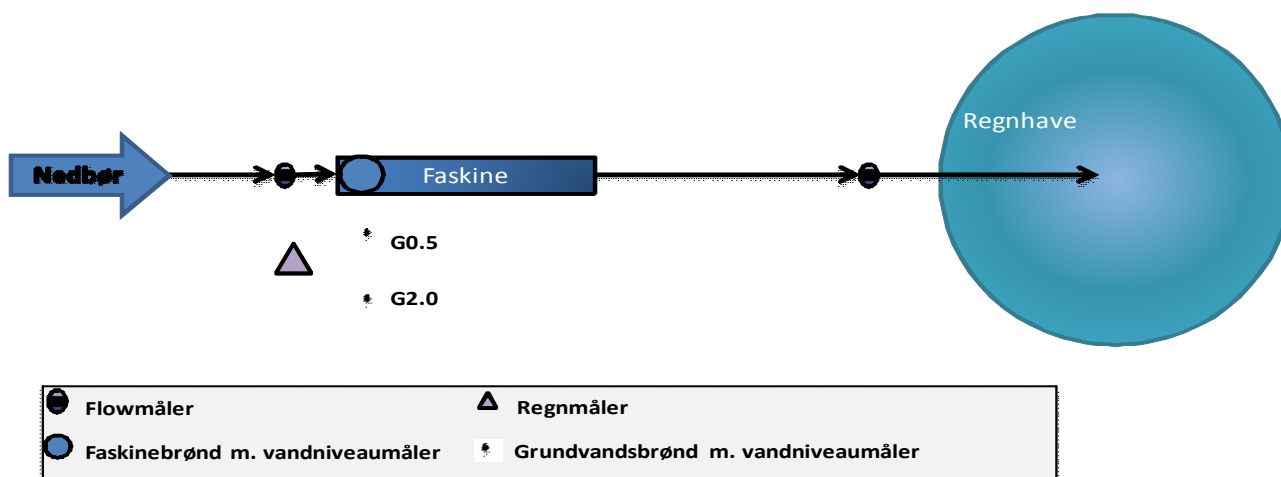
Københavns energi giver i dag et tilskud på op til ca. 20.000 kr. til husstande, der frakobler sit regnvand fra kloakken og til en faskine. Dette er fordi der er, i tillæg til de store miljømæssige gevinster, op til 10 milliarder kroner at spare i København ved at satse på nye faskiner i stedet for at udbygge det eksisterende kloakanlæg (Københavns energi, 2009; ingeniøren, 2009b). Der er derfor mange gode grunde til at implementere faskiner i Danmark og specielt i København. Samtidigt mangler det dokumentation på, hvordan faskiner fungerer i praksis, specielt over længere tid (19k, 2009a).





## 2 Formål

I 2009 byggede Teknologisk Institut (TI) to energieffektive huse kaldt 'EnergyFlexHouse' (EFH) færdig. Husene ligger i Taastrup, tæt på København (Teknologisk institut, 2009). Fra taget af begge huse samt fra dele af belægningen bliver regnvand ledt ned i tre forskellige faskiner. Faskinerne er koblet til en såkaldt 'Regnhave' for overløb. En Regnhave er en fordybning i landskabet, der fungerer som et mindre bassin når overløbet fra faskinerne tillader dette. Faskinerne ved EFH er bygget for at indsamle og dokumentere erfaringer om faskiners drift og levetid (19k, 2009a). Faskine nummer tre blev derfor i efteråret 2009 udstyret med nogle måleapparater; En flowmåler ved indløbet, en flowmåler ved overløbet, en vandniveaumåler i faskinen, to målere af grundvandstanden henholdsvis 0,5 og 2 meter væk fra faskinen, en vandmætningsgradsmåler i jorden samt en nedbørsmåler. Se Figur 3 for skitse af opsætningen.



Figur 3 Skitse af opsætningen. Af de to grundvandsbrønde benævnes den tættest på faskinen, ca. 0,5 m væk, for 'G0.5' og den længst væk fra faskinen, ca. 2 m for 'G2.0'. Se markering på figuren. Vandsætningsgradsmåleren befinder sig under faskinen.

Formålet med dette projekt er at undersøge faskiner som en bæredygtig løsning til håndtering af regnvand i byer, med udgangspunkt i København. For bæredygtigt at kunne håndtere vand i byer, skal det tilstræbes, at den hydrologiske cyklus fungerer som hvis byerne ikke havde eksisteret. Dette kan gøres ved at håndtere regnvand lokalt, som f.eks. ved en faskine eller en regnhave. Der vil i denne opgave kun fokuseres på den kvantitative bæredygtighed, ikke det kvalitative, det vil sige at de forureningsmæssige aspekter eksempelvis ikke medtages.

En faskine er en relativt simpel teknologi, der i høj grad gør den afhængig af variable udenfor selve teknologien, så som nedbør og jordens egenskaber. Den hydrauliske ledningsevne, klimaet, jordens hældning og grundvandstanden er derfor afgørende for, hvor effektivt et givent faskinevolumen vil fungere et givent sted. En stor faskine vil selvfølgelig være mere kostbar og kræve større plads. Dimensionering af faskiner er hermed en udfordring, da de bør dimensioneres så små som muligt, men samtidig kunne holde til kun at have overløb til en given gentagelsesperiode.

Delformålene i dette projekt er at:

- 1) Verificere de online monitorerede data, dette gøres ved at:
  - a) Sammenligne nedbørsdata fra regnmåleren med data fra spildevandkomiteens regnmålere i nærheden.
  - b) Pejle vandniveauet i faskine og i grundvandsbrønde manuelt og sammenligne med online målingerne.
  - c) Manuelt måle flow ud til regnhaven
- 2) Undersøge hvor højt grundvandstanden står i forhold til faskinen og finde grundvandets strømningsretning. Dette gøres ved at finde den hydrauliske gradient, ' $\Delta h/\Delta L$ ', mellem vandspejlet i faskinen og grundvandsbrøndene, på baggrund af vandniveauerne justere til absolutte koter efter nivellering og pejlingerne.
- 3) Lave en massebalance for faskinen. På baggrund af massebalancen samt hydrologiske formler laves så en simpel computersimulering i 'Matlab', en massebalancemodel, der med nedbør som input beskriver faskinens opførsel over tid. De simulerede vandniveauer i faskinen vil derefter sammenlignes med de monitorerede vandniveauer.
- 4) Estimere den mættede hydrauliske ledningsevne,  $K_s$ , for jordbunden ved faskinen ud fra
  - a) Feltmålinger med et permeameter,
  - b) Vandspejlets faldrate fra de online monitorerede data
  - c) Kalibrering til massebalancemodellen.

Denne ledningsevne bliver senere benyttet som input i massebalancemodellen.

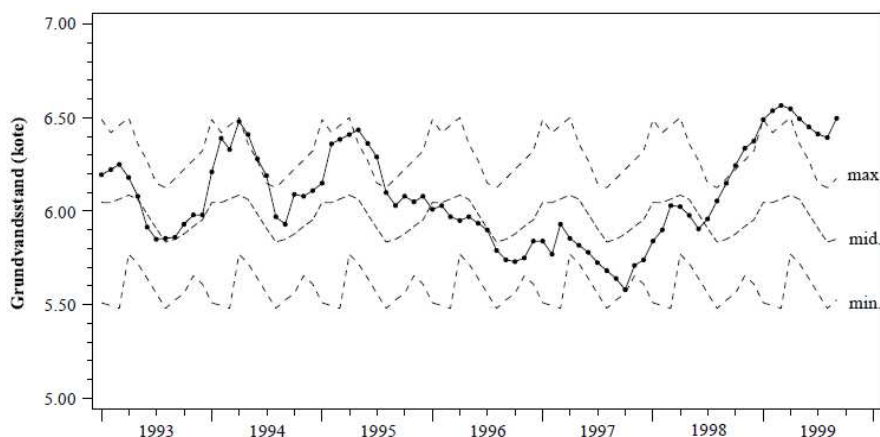
- 5) Vurdere ud fra massebalancemodellen, hvorvidt faskiner er en bæredygtig løsning for håndtering af regnvand ved EFH, et område hvor den hydrauliske ledningsevne er lav og grundvandspejlet står højt. Dette vil blive bestemt efter
  - a) Hvor hyppigt der forekommer overløb og om faskinen overholder den dimensionerede gentagelsesperiode på 0,1 år
  - b) Hvor stort overløbsvolumen er, og hvor stor del af vandvolumen der nedsiver, i forhold til hvor stor del der går til regnhaven.
  - c) Hvad effekten af en ekstrem nedbørshændelse er på systemet. Dette vil anslås vha. designregn med en gentagelsesperiode på 10 år.
- 6) Massebalancemodellen vil yderligere benyttes til at undersøge outputtet til Regnhaven. Dette er for at undersøge om Regnhaven fungerer som planlagt, og om hermed Regnhaver kan være en bæredygtig løsning for håndtering af regnvand ved forhold som ved EFH.
- 7) Afslutningsvis vil resultaterne fra TI blive kort sammenlignet med lignende undersøgelser fra litteraturen. Desuden vil der forsøges at afgøre hvad resultaterne fra denne undersøgelse har at sige for der resterende København, og om faskiner, men også regnhaver kan bidrage til en bæredygtig håndtering af regnvand i byer som København.

### 3 Baggrund og teori

I det følgende præsenteres først projektets teoretiske baggrund, samt de formler der senere bliver benyttet. Derefter kommer et kort litteraturstudie om faskiner med fokus på faskiner i leret jord i Skandinavien.

#### 3.1 Hydrologisk baggrund

Princippet med en faskine er at perkolere regnvand fra et underjordisk magasin ned til grundvandet. Vand der strømmer fra overfladen og ned i jorden betegnes nedsivning, mens vandets bevægelse i jorden til de dybere jordlag betegnes perkolation. For faskiner er der næsten altid en perkolation til det sekundære grundvandsreservoir, som ligger tæt på overfladen – ikke det primære grundvandsspejl som er større og regionalt og ligger længere nede i undergrunden, og benyttes som drikkevandsressource. Grundvandsspejlet varierer med årstiden og er højest om foråret på grund af vinternedbøren og snesmeltning og lavest om sommeren på grund af den tørrere jord. Vinternedbøren er også mere afgørende en sommernedbøren på grund af den begrænsede vegetation om vinteren (GEUS, 2000). Sæsonvariationen for et grundvandsspejlet i Danmark kan ses på Figur 4.



Figur 4, Grundvandsstand for Villingerød Nordsjælland for 1993-1999. Minimum, maksimum og middelværdierne for perioden 1971-92 er også indtegne ( National vandressource model if. Geus 2000).

##### 3.1.1 Massebalance

Princippet med en massebalance er, at masse ikke kan opstå eller forsvinde i en transformation eller transportproces, og dermed er massen i et bestemt område den akkumulerede masse, lig med:

$$\text{Akkumuleret} = \text{ind} - \text{ud} + \text{produceret} \quad 1.)$$

(Nazaroff & Alvarez-Cohen, 2001)

For at kunne modellere, hvordan en faskine fungerer, opsættes først en massebalance. Derefter beskrives alle størrelser der går ind eller ud af systemet. I afsnit 3.1.2-3.1.3 gennemgås den hydrologiske teori til at beskrive disse størrelser.

### 3.1.2 Afstrømningsmodel

Nedbøren, der tilføres faskinen kan estimeres ud fra en afstrømningsmodel. Der findes flere former for afstrømningsmodeller, og i denne opgave er tilstrømningen meget simpelt beskrevet som en funktion af nedbør og oplandsarealet, en model der herefter bliver kaldt 'simpl afstrømningsmodel':

$$Q = C i A \quad 2.)$$

(Brutsaert, 2005)

Hvor  $A$  [ $m^2$ ] er oplandsarealet og  $i$  [ $m/s$ ] er nedbøren.  $C$  er en korrektionsfaktor, eller afstrømningskoefficient, der angiver hvor meget nedbør, der går tabt fra oplandsarealet ud fra oplandsarealets overfladeegenskaber ( $0 < C < 1$ ). Normalt ligger  $C$  mellem 0,75 og 0,95 for tage (Brutsaert, 2005).

Denne model er simpel, da den ikke tager transporttiden fra oplandet til faskinen med, eller detaljerne i hvordan nedbør forsvinder fra oplandsarealet (fordamper, evaporere eller lignende). Samtidig er fordelene med denne model også dens simplificeringer, da den hurtig og med få parametre giver et overslag over tilstrømningen til faskinen (Mikkelsen, 1993). Det er vist, at afstrømningsmodellen passer bedst til de tidligste stadier af en nedbørshændelse (Brutsaert, 2005).

### 3.1.3 Vands strømning i jord

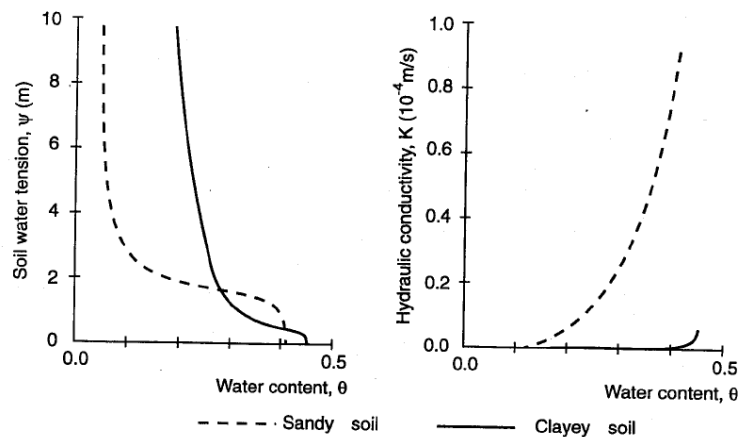
Strømninger i porøse medier, så som vand i jord, er meget komplicerede og dermed er det en stor udfordring at beskrive disse simpelt matematisk. En række forenklinger og antagelser er derfor nødvendige for, at der ikke kræves alt for meget tid og/eller indsamling af data. Strømninger af vand i jord sker som konsekvens af forskelle i potentiel energi. En umættet strømning er i hovedsagen bestemt af kapillære kræfter og tyngdekraften. I en mættet strømning er det hovedsagligt de hydrostatiske kræfter, der afgør strømningen sammen med tyngdekraften. Kapillære kræfter er en blanding af vands binding til jordpartiklerne og vands overfladespænding (Fetter, 2001), og medfører at vandet bliver 'trukket' ind i tør jord. Kapillariteten beskrives ved det umættede trykniveau,  $\psi$ , der beskriver størrelsen af kræfterne hvormed jorden trækker vandet til sig.

Det porøse mediums egenskaber er også afgørende for strømningen. Den hydrauliske ledningsevne,  $K$ , beskriver et porøst medies evne til at lede væsker igennem mediet.  $K$  er i hovedsagligt afhængig af mediets kornstørrelse, se Tabel 1 for variationerne af  $K$  over jordarter. Da jord er heterogent og ofte indeholder makroporer kan estimeringen af  $K$ , selv for et mindre område, indebære store usikkerheder (Mikkelsen, 1995). Normalt findes  $K$  ud fra jordprøver og kornstørrelser eller ved at benytte et permeameter.

**Tabel 1, Forskellige typiske danske jordarter sammen med deres kornstørrelse og hydrauliske ledningsevne (Bouwer, 1984 ; VAV, 1983 if. Mikkelsen & Jacobsen, 1993).**

Jordtype	Kornstørrelse	Hydraulisk ledningsevne, $K$
	$\mu m$	$m/s$
Grus	2 000 – 60 000	$10^{-3} - 10^{-1}$
Sand	50-2 000	$10^{-5} - 10^{-2}$
Silt	2-50	$10^{-9} - 10^{-5}$
Ler	0-2	$< 10^{-9}$
Moræneler	-	$10^{-10} - 10^{-6}$

På Figur 5 kan det ses hvordan  $\psi$  falder, og  $K$  stiger, ved øgende vandmætningsgrad.



Figur 5, Kapillaritet (venstre) og hydraulisk ledningsevne (højre) som funktion af vandmætningsgraden.

### 3.1.3.1 Infiltrationskapacitet

Et medies evne til at infiltrere vand, benævnes infiltrationskapaciteten,  $f$ , og kan bestemmes ved den følgende formel efter Green og Ampt:

$$f(t) = K \left( 1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F} \right) \quad 3.)$$

(Binning & Bauer-Gottwein, 2009)

Hvor  $F$  er det allerede infiltrerede vand, og  $\Delta \theta$ , vandindholdet i jorden er givet ved:

$$F = \Delta \theta L \quad 4.)$$

$$\Delta \theta = \theta_s - \theta_i \quad 5.)$$

(Binning & Bauer-Gottwein, 2009)

Hvor  $\theta_s$  beskriver vandindholdet i jorden, og  $\theta_i$  er initialkoncentrationen af vand i jorden.  $L$  er længden af den våde jord. Hvis et medie bliver udsat for så store mængder vand at infiltrationskapaciteten overskrides vil vandet ikke kunne infiltreres og dermed, afhængig af overfladen, enten afstrømme eller samle sig på overfladen til infiltration er muligt. Det ses af Green og Ampt formelen at hvis jorden er mættet vil de kapillære kræfter, i samsvar med teorien om infiltration, være lig nul (se Figur 5) og infiltrationskapaciteten vil kun være bestemt af den hydrauliske ledningsevne. Hermed kan infiltrationen beskrives ved Darcys lov, en empirisk lov baseret på eksperimenter, som beskriver hastigheden, hvormed vand strømmer lodret i et mættet porøst medie. Darcys lov er givet ved:

$$Q = KA \frac{dh}{dt} \quad 6.)$$

(Binning & Bauer-Gottwein, 2009)

Hvor  $A$  er tværsnitsarealet af medie,  $dl$  er længden af medie og  $dh$  er forskellen i trykniveau mellem indløbet og udløbet til mediet.

### 3.1.3.2 *Hydraulisk gradient*

Den hydrauliske gradient er forskellen i to vandspejls trykniveau ( $dh$ ) divideret med afstanden mellem dem ( $dl$ )

$$\text{grad } h = \frac{dh}{dl} \quad 7.)$$

(Binning & Bauer-Gottwein, 2009)

Grundvandstrømningen er i mættede isotropiske materialer parallel med, men modsat rettet af, den hydrauliske gradient. Dette betyder, at vandet strømmer fra områder med højt energiniveau til lavere energiniveau. Det antages normalt, at hastighedshøjden af vandet kan ignoreres da vandet bevæger sig meget langsomt (NC Water, 2010). Det ses, at den sidste del af Darcys lov tilsvarende den hydrauliske gradient.

### 3.1.3.3 *Enhedsløs hydraulisk gradient*

Perkolationen ud fra en faskine kan bestemmes ved Darcys lov ved at sætte den hydrauliske trykgradient til 1, hvilket vil sige, at der antages at ske en lodret tømning, kun drevet af gravitationen. Dette kan gøres om der antages, at der kun sker udstrømning gennem bunden af faskinen (Paus et al., 1947 if. Mikkelsen & Jacobsen 1993). At sætte den hydrauliske trykgradient til 1 kan også gøres i modeller, der medtager perkolations gennem siderne selvom strømmingen foregår lodret (Ericsson 1978, if. Mikkelsen & Jacobsen 1993), altså at der sker en endimensional strømning kun drevet af gravitation. En model af en faskine af Mikkelsen (1992, if. Mikkelsen & Jacobsen 1993) viste at antagelsen om  $dh/dl=1$  er rimelig. Dette var dog for en faskine med relativt stort magasineringsvolumen i forhold til udsivningsareal.

### 3.1.3.4 *Permeameter*

For at bestemme et medies  $K$  på stedet, kan der benyttes et permeameter, hvor der findes flere typer. I dette projekt blev et 'konstant-energiniveau' permeameter benyttet. Se mere om den eksakte model i metodeafsnittet (afsnit 4.1.1).

Permeameteret måler hvor meget vand jorden suger til sig. Instrumentet består hovedsagligt af et vandreservoir og placeres i en boret brønd. Ved at tage tiden på, hvor hurtigt vandet forlader permeameteret kan flowet ind i jorden bestemmes. Permeameterets mekanisme gør således at der er en konstant vandstand i brønden og dermed er det vand der forlader permeameteret lig den mængde vand jorden suger til sig. Ved et jævnt flow ud i en brønd vil der efter noget tid komme et mindre pæreformet område omkring hele brønden hvor jorden er mættet (Philip, 1985; Elrick et al., 1989; Stephens & Neuman 1982 if. Elrick og Reynolds, 1992). Vandet vil herefter suges op af jorden med en konstant rate og den hydrauliske mættede ledningsevne,  $K_s$ , kan bestemmes.

Målingerne med et permeameter indebærer en unaturlig hurtig infiltration, noget der medfører at noget luft bliver 'fanget' inde i mediet og mediet således ikke er fuldstændig mættet (Solimoisture equipment corp, 2005). Efter et stykke tid vil mediet kunne blive helt mættet, og da vandet nu kan strømme hurtigere da det ikke bliver begrænset af luftbobler, er den målte hydrauliske ledningsevne en anelse lavere end  $K_s$  (Mikkelsen & Jacobsen, 1993). Derfor kaldes den hydrauliske ledningsevne, der bliver beregnet ud fra



målingerne med et permeameter for den 'felt-mættede  $K_s'$ , (field-saturated hydraulic conductivity) eller bare  $K_{fs}$ , som kan beskrives ved den følgende formel:

$$K_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \frac{H}{\alpha^*}} \quad 9.)$$

(Elrick & Reynolds, 1992)

Hvor  $a$  er brøndens radius [cm],  $H$  er den indstillede vandhøjde [cm],  $C$  er en dimensionsløs konstant, der ud fra jordtypen bestemmer detaljerne i formen til den mættede 'pære' omkring brønden,  $Q$  er flowet ud af permeameteret og  $\alpha^*$  er den makroskopiske længdeparameter, der afhænger af jordens tekstur og struktur, og beskriver forholdet mellem gravitation og de kapillære kræfter ved infiltrationen. Leddene under brøkstregen beskriver hvordan vandet siver ind i jorden som konsekvens af henholdsvis hydrostatisk tryk, gravitation og kapillære kræfter (Elrick & Reynolds, 1992).

Formelen for at beregne  $K_{fs}$  ud fra permeameterets målinger er baseret på antagelsen om at

$$\alpha^* \equiv \frac{K_{fs}}{\phi_m}$$

(Elrick & Reynolds, 1992)

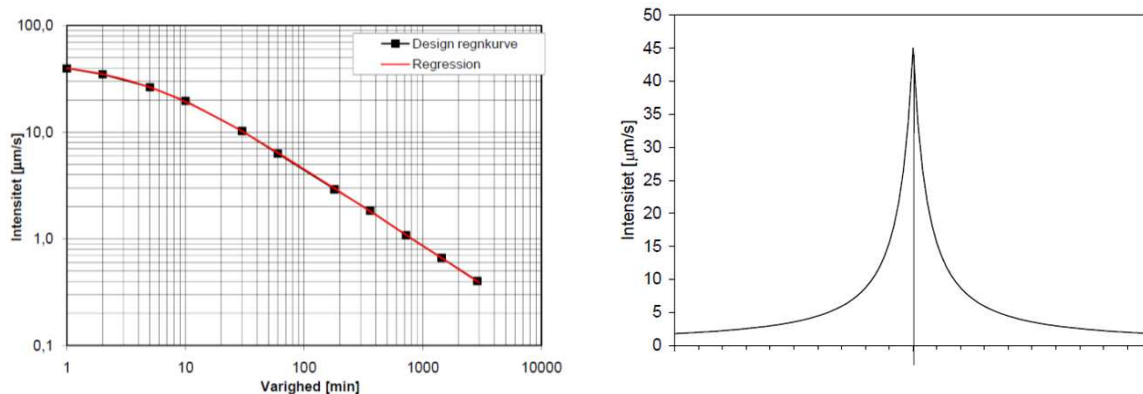
Hvor  $\phi_m$  er kapillariteten til det umættede medie. Fordelen ved  $\alpha^*$  er at den kun varierer mellem 0.01-0.5  $\text{cm}^{-1}$  (White & Sully 1987, if. Elrick & Reynolds, 1992),  $K_{fs}$  og  $\phi_m$  derimod kan variere i flere størrelsesordner. Den anden fordel ved  $\alpha^*$  er at den afhænger af jordens tekstur og struktur og kan skønnes ud fra jordtypen. Dette medfører, at målingerne med permeameteret sammen med  $\alpha^*$  kan bruges til at bestemme  $K_{fs}$  for umættede porøse medier (Solimoisture equipment corp, 2005).

Eftersom jorden sjældent er homogen og usikkerheder i selve måleteknikkerne oplyser Mikkelsen & Jacobsen (1993) at måleusikkerheden kan være på op til 1000 % for måling af den mættede hydrauliske ledningsevne.

### 3.1.4 Dimensionsgivende nedbør

Når kloakker og andre anlæg, der har nedbør som den dimensionsgivende faktor skal dimensioneres, er der i Danmark en tradition for enten at benytte kasseregn eller CDS regn. Kasseregn er nedbørshændelser, der hydrografisk ligner en kasse, altså nedbør med konstant intensitet. Gennemsnittet af historiske nedbørsdata bruges som grundlaget til at lave IDF (Intensity-Duration-Frequency) kurver. På en IDF kurve kan der, for en bestemt gentagelsesperiode, aflæses en intensitet af nedbør med en bestemt varighed eller varigheden af nedbør med en bestemt intensitet. På Figur 6 (venstre) ses en IDF kurve fra Spildevandskomiteens (SVKs) regnmåler 30386 som ligger tæt på EFH. Er systemet hydraulisk kompliceret anbefales det at benytte CDS regn til dimensioneringen, og CDS regn benyttes også i stor udstrækning til dimensionering af afløbssystemer i Danmark i dag (Miljøstyrelsen, 2006). CDS regn er en symmetrisk designhydrograf der indeholder informationen om maksimal middelintensitet for en række nedbørshændelser med forskellig varighed for et bestemt sted til en bestemt gentagelsesperiode (se Figur 6 (højre)). For kasseregn skal der udvælges både en gentagelsesperiode og en dimensionsgivende varighed, men med CDS regn er det tilstrækkeligt at udvælge en gentagelsesperiode, da hydrografen tager højde for alle intensiteter og varigheder for denne gentagelsesperiode (Styregruppen for spildevandskomiteens

regnmålersystem, 2006). Hvis bare intervallet for CDS sættes stort nok er tilnærmelsesvis alle regnhændelser med.



Figur 6. (venstre) IDF kurve for SVKS regnmåler 30386 Albertslund Materialegård, for nedbørsdata fra DMI fra 1979-2005. Kurven angiver gentagelsesperioden  $T=10$  år (Spildevandskomiteen, 2010). (højre) regnintensitetskurve for CDS regn som funktion af tiden, strengen i midten angiver symmetriaksen (Styregruppen for spildevandskomiteens regnmålersystem, 2006).

## 3.2 Om faskiner

Faskiner er en relativt simpel teknologi, der hovedsageligt har sin effektivitet afgjort af ydre parametre som nedbør, jordens egenskaber samt grundvandsforholdene. Det er dermed vigtigt at disse parametre er undersøgt i forvejen, inden en faskine anlægges, for at afgøre hvor stor en faskine skal være et givet sted.

### 3.2.1 Jord og grundvand

For at perkolation skal kunne foregå fra faskinen skal der være jordbundsforhold, der tillader dette og vandstanden i faskinen bør befinde sig over grundvandsspejlet, så der er en hydraulisk gradient, der driver vandet ud af faskinen. Københavns kommune anbefaler generelt, at der mindst er en meter ned til årets højeste grundvandsspejl (Københavns kommune, 2009a). Det er også vigtigt at faskiner ikke etableres for tæt på bygninger, da dette kan medføre oversvømmede kældere (IDA spildevandskomiteen, 1994). Normalt gælder en afstand på 2-5 meter fra huse, alt efter om huset er beboet og om det har en kælder (Københavns kommune, 2009a). Faskiner kan, ved overbelastende mængder vand, gøre jorden ovenover blødere, alligevel kan det være muligt at placere faskiner under veje, hvis bare faskinen består af plastikkassetter og er dimensioneret efter den aktuelle belastning (Københavns kommune, 2009a).

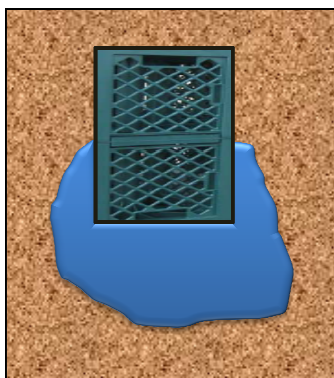
Jordbundsforholdene vurderes først og fremmest af jordens hydrauliske ledningsevne,  $K$ . I virkeligheden er der ikke nogen minimumsgrænse for jordens ledningsevne, der hvor en faskine skal etableres. Alligevel opereres der med minimumsgrænser, da en meget lav ledningsevne ville medføre en meget stor faskine, noget som er både praktisk og økonomisk u hensigtsmæssigt. Københavns kommune anbefaler at ledningsevnen ligger mellem  $5 \cdot 10^{-3}$  og  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s, og at den ikke bør være mindre end  $10^{-7}$  m/s (Københavns kommune, 2009a). I delstaten Maryland i USA anbefales det ikke at bygge infiltrationssystemer i områder, hvor den mættede hydrauliske konduktivitet er mindre end  $1.89 \cdot 10^{-6}$  m/s. Dette tal er dog baseret på, at der kun sker perkolation gennem bunden af faskinen (Duchene et al., 1994). Stahre og Urbonas (1990, if. Duchene et al., 1994) mener grænsen går ved  $K_s = 2 \cdot 10^{-5}$ . Rørcenteret (2005) anbefaler, at der ikke anlægges faskiner i jordbund, der har mindre hydraulisk ledningsevne end  $10^{-8}$  m/s.

Det har også stor indvirkning på perkolationen om jorden indeholder makroporer, da disse gør således at vandet kan strømme hurtigere. Rødder og dyr i jorden kan medføre makroporer, mens jord ved nybyggeri normalt er komprimeret og dermed mangler makroporer (Ferguson, 1994). Flest makroporer findes i gamle skovbunde, hvor makroporene kan være op til 100 år gamle. Ved konstruktionen af infiltreringsanlæg er der derfor i nogle tilfælde bevidst ladet mest muligt af den naturlige vegetation og jordbund stå for at optimere regnvandsafledningen (Ferguson, 1994). Infiltrationskapaciteten ved en overflade med vegetation er på grund af makroporene næsten den samme uafhængig af jordbundstype. Det er derfor vigtigt at skelne mellem vand, der infiltrerer gennem en vegeteret overflade og vand der perkolerer fra et magasin (Mikkelsen & Jacobsen, 1993).

Den jordbundstype med størst variation i ledningsevnen er leragtige jordbunde. De elektrokemiske kræfter på overfladen af lerpartikler kan medføre en sammenbinding af partiklerne i større 'aggregater', noget som samtidig medfører store hulrum i jorden og dermed giver leret en større ledningsevne end normalt ventet (Ferguson, 1994). På den anden side har nogle lerjorde fysisk-kemiske egenskaber, der gør at leret disaggregerer og laver ustrukturerede, lagvise lag med høj tæthed, noget der sænker den hydrauliske ledningsevne (Ferguson, 1994). Organisk materiales tilstedeværelse kan også bidrage til at leret klæber sig sammen og dermed øges ledningsevnen, men for at beholde denne konduktivitet skal der være en kontinuerlig tilførsel af friskt organisk materiale (Ferguson, 1994).

For at finde jordens nedsivningsevne med tanke på at anlægge en faskine på privat grund, anbefaler Københavns kommune, at der udføres en nedsivningstest. Nedsivningstesten består i at grave et 30 cm dybt hul og fylde vand i til jorden omkring er mættet. Bagefter måles, hvor hurtigt vandet forlader hullet (Københavns kommune, 2009a). Denne metode følger det samme princip som et permeameter, men er en del mere unøjagtig.

Hvis grundvandstanden står over faskinens bund, vil der stadig kunne ske en nedsivning. Dette vil i siderne dog kun være op til den højde grundvandstanden når. Grunden til dette er, at der hverken er tyngdekraft, kapillære kræfter eller en hydraulisk gradient til at trække vandet ud. Perkolation gennem bunden og gennem siderne over grundvandsspejlet er dog fortsat muligt (Rørcenetret, 2005). Vandet perkolerer ud af faskinen i en mættet tilnærmelsesvis pæreagtig form. Formen afgøres af faskinens geometri, grundvandsspejlets beliggenhed og de kapillære kræfter (Mikkelsen, 1995) se eksempel på Figur 7.



Figur 7, Illustration af faskine set fra endefluden der viser eksempel på hvordan vandet strømmer i tilnærmelsesvis "pæreagtig" form ud fra faskinen

### 3.2.2 Dimensionering af faskiner

Den danske nuværende standard for dimensionering af faskiner har eksisteret siden 1993, og tager højde for K samt geometrien af faskinen. Først bestemmes en gentagelsesperiode, så bestemmes faskinens geometri. Ud fra K, formlerne beskrevet i dette afsnit samt et dimensioneringsdiagram kan det specifikke magasineringsvolumen,  $V_r$ , findes.  $V_r$  er defineret ved:

$$V_r = \frac{V}{A_{red}} \quad 10.)$$

(IDA spildevandskomiteen, 1994)

Altså volumen faskine pr reduceret areal, hvor det reducerede areal,  $A_r$ , er givet ved:

$$A_r = A * C \quad 11.)$$

(IDA spildevandskomiteen, 1994)

hvor C er afstrømningskoefficienten og A er oplandsarealet (tilsvarende A og C i afsnit 3.1.2)

Normalt dimensioneres faskiner til en gentagelsesperiode, T, på 2 år, altså et overløb hvert andet år. Dette er den samme gentagelsesperiode som benyttes til kloakkernes fællessystemer. Gentagelsesperioden kan sættes ned, hvis faskinerne har overløb (Rørcenteret, 2005)

KAR er faskinens karakteristiske tømningstid, og beskriver hvor hurtigt faskinen tømmes for vand. KAR er givet ved:

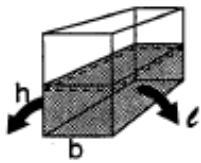
$$KAR = \frac{V_r}{Q_{inf}} = \frac{V_r}{a_r} \quad 12.)$$

(IDA spildevandskomiteen, 1994)

Altså forholdet mellem faskinens specifikke magasineringsvolumen  $V_r$ , og perkolationskapacitet,  $Q_p$  eller forholdet mellem det specifikke magasineringsvolumen og afløbstallet for faskinen,  $a_r$ .  $a_r$  varierer med faskinens geometri, se overblik over KAR og  $a_r$  for forskellige faskiner på Figur 8. Faskiner med forskellig geometri vil derfor have forskellig karakteristisk tømningstid (IDA spildevandskomiteen, 1994).

## a) INGEN UDSIVNING GENNEM BUNDEN

### Rendefaskine



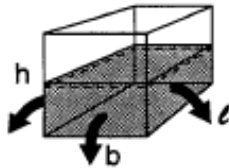
$$V_r = \frac{\ell b h \phi}{A_{red}}$$

$$a_r = \frac{\ell h K}{A_{red}}$$

$$KAR = \frac{b \phi}{K}$$

$$\ell = V_r \frac{A_{red}}{b h \phi}$$

### Rektangulær faskine



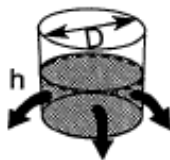
$$V_r = \frac{\ell b h \phi}{A_{red}}$$

$$a_r = \frac{(\ell+b) h K}{A_{red}}$$

$$KAR = \frac{\ell b \phi}{(\ell+b) K}$$

$$h = V_r \frac{A_{red}}{\ell b \phi}$$

### Cirkulær faskine



$$V_r = \frac{\pi D^2 h \phi}{4 A_{red}}$$

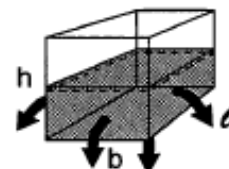
$$a_r = \frac{\pi D h K}{2 A_{red}}$$

$$KAR = \frac{D \phi}{2 K}$$

$$h = V_r \frac{4 A_{red}}{\pi D^2 \phi}$$

## b) UDSIVNING GENNEM SIDER OG BUND

### Rektangulær faskine



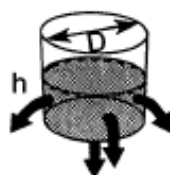
$$V_r = \frac{\ell b h \phi}{A_{red}}$$

$$a_r = \frac{[(\ell+b)h + \ell b] K}{A_{red}}$$

$$KAR = \frac{\ell b h \phi}{[(\ell+b)h + \ell b] K}$$

$$\ell = V_r \frac{A_{red}}{b h \phi}$$

### Cirkulær faskine



$$V_r = \frac{\pi D^2 h \phi}{4 A_{red}}$$

$$a_r = \frac{\pi K D (D/4 + h/2)}{A_{red}}$$

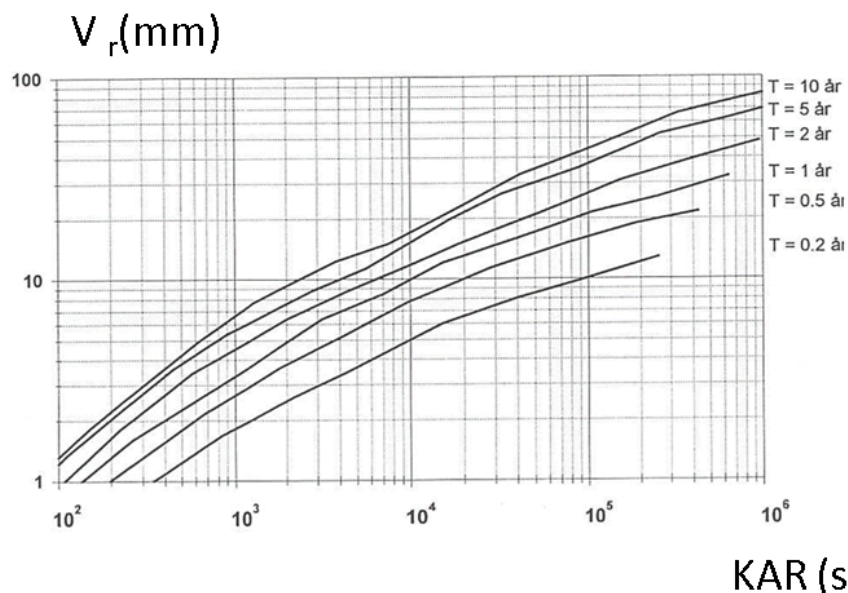
$$KAR = \frac{\phi}{K(1/h + 2/D)}$$

$$h = V_r \frac{4 A_{red}}{\pi D^2 \phi}$$

Figur 8, Formler til dimensionering af faskiner med forskellig geometri. Der antages normalt ingen udsivning gennem bunden. KAR = Karakteristisk tømningstid, K = hydraulisk ledningsevne,  $\phi$  = porøsitet i faskinen,  $A_{red}$  = det reducerede areale,  $V_r$  = specificit magsineringsvolumen,  $a_r$  = afløbstatlet for faskinen ( Mikkelsen og Jacobsen, 1993).

For det meste udformes faskiner som firkantede, og da enten som en rektangulær faskine eller en rendefaskine. En rendefaskine er også en rektangulær faskine, men den er så lang og smal, at der kan ses væk fra udsivning gennem endefladerne. Da der normalt medregnes, at faskiner tilstoppes med tiden i bunden, dimensioneres der normalt efter kun udsivning fra siderne (IDA spildevandskomiteen, 1994).

Når geometrien af faskinen er kendt, bestemmes en KAR ud fra geometriparametre og K. Herefter kan det specifikke magasineringsvolumen aflæses på skemaet i Figur 9. Hvis l eller h indgår i formelen for KAR, skal der itereres indtil formelen for  $V_r$  stemmer (IDA spildevandskomiteen, 1994).



Figur 9, Diagram der viser sammenhængen mellem karakteristisk tømningstid, KAR, og specifikt magasineringsvolumen,  $V_r$ , for udvalgte gentagelsesperioder. Diagrammet er baseret på regndata fra Måløv 1979-92 (IDA spildevandskomiteen, 1994).

For faskiner gælder at i leret jord er længerevarende regn dimensionsgivende og i sandjord er kortvarigt regn dimensionsgivende (Mikkelsen & Jacobsen 1993). Da nedsivningen er langsom i leret jord, er der ofte flere regnhændelser efter hinanden, der kan medføre overløb, ikke en enkelt stor hændelse. Skemaet i figur 8 er derfor baseret på flertallige simuleringer for flere og på sig følgende regnhændelser for at give et realistisk bud på faskinens dimensioner. Dimensioneringspraksisen tager dog ikke højde for snesmelting (Mikkelsen & Jacobsen 1993).

### 3.2.3 Om faskiner ved lignende forhold

Som baggrund for projektet blev der gennemført et kort litteraturstudium, der omhandlede faskiner under lignende forhold som de ved EFH, hvilket vil sige faskiner i Skandinavien i områder med leret jord. Der findes mange andre undersøgelser, der beskriver faskiner i lande med varmere klima og andre jordbundsforhold, men dette anses ikke som relevant for denne opgave.

#### 3.2.3.1 Generelt

Faskiner har eksisteret i flere århundreder i Skandinavien, men dokumentationen for deres drift og levetid er sparsommelig. Allerede i 1949 havde Lyngby-Taarbæk kommune regler for faskiner, så der har under alle omstændigheder været faskiner i Storkøbenhavn allerede da (Lindvall & Hogland, 1981). I 1970'erne blev der udført en større skandinavisk undersøgelse af faskineanlæg, vel at mærke for at lave en kortlægning over anlæg der havde haft driftsproblemer og hvad problemerne skyldtes (Lindvall & Hogland, 1981). Årsagen til problemerne viste sig i de fleste tilfælde at være en underdimensionering af faskinen så der kom ukontrollerede overløb. Flere af faskinerne havde dog fungeret i lang tid med lidt eller ingen form for



vedligeholdelse. Hele undersøgelsen havde i stor grad problemer med mangel på dokumentation (Lindvall & Hogland, 1981).

En anden undersøgelse omkring danske kommuners erfaringer med faskiner viste, at selv faskiner i fed lerjord med fordel kan anvendes. Dette er dog under forudsætningen om vegetation, der kan danne sprækker og hulrum i leret (spildevandsforskning fra miljøstyrelsen, 1992). Vestergren (2010) påpeger også at flere studier har vist, at mulighederne for at nedsive regnvand i områder med lav permeabilitet er overraskende gode. Undersøgelsen omkring erfaringer i danske kommuner angav, at høj grundvandstand kan være et problem for faskiner, f.eks. har dette været tilfældet i Tårnby kommune (Spildevandsforskning fra miljøstyrelsen, 1992).

### **3.2.3.2 Bratthammar**

Bratthammar er et boligområde lige udenfor Göteborg i Sverige. Området er ca. 350 km<sup>2</sup> stort og blev bygget i slut 1970'erne. Det meste af regnvandet blev ledt i faskiner, der var dimensioneret til en regnhændelse med et døgn's varighed og en gentagelsesperiode på 2 år. Alle faskinerne var lange og smalle og havde overløb til kloaksystemet. De geologiske forhold er som resten af Göteborgsområdet, med leret jord og meget højt grundvandspejl. Projektets mål var at vurdere, hvordan faskinerne fungerer. Der blev målt nedbør, vandstand, poretryk, temperatur, grundvandstande, flow fra faskiner og flow i områdets hovedafløb, i perioden 1976-1979. Der blev vurderet, at faskinerne bidrog til det sekundære grundvandspejl. Magasinerne tømtes hurtigere om sommeren end forår/efterår, med en årsvariation på ca. 100 %. Der blev konkluderet, at der skete en udsivning fra faskinerne, men de nøjagtige tal og den hydrauliske ledningsevne blev ikke bestemt. Faskinerne havde en udsivning om sommeren, men om efteråret og foråret skete en påfyldning af grundvand ind i faskinen. Enkelte faskiner havde derfor ingen netto perkolations ind eller ud af magasinet i løbet af et år. Dette blev dog vurderet som uproblematisk da målet med faskinerne hovedsagligt var at modvirke fugtighedsvariationer i de øverste lerlag for at undgå sætninger i bygningerne (Homstrand et al. 1980).

### **3.2.3.3 Nørrebro**

I indre København, på Nørrebro, blev der i en boligkarre i 1990'erne bygget to faskiner for at undersøge og følge et faskineanlægs funktion, specielt i byområder med leret jord. Hver af faskinerne havde et aktivt magasinervolumen på 4 m<sup>3</sup>, og ved en højde på ca. en halv meter over bunden var faskinerne koblet sammen. Anlægget blev undersøgt kontinuerligt i de første 2,5 år. Efter en pause på 12 år blev målingerne genoptaget for nogle måneder (Mikkelsen et al., 1998; Bergman et al., 2010).

I den første periode blev der målt nedbør, vandstand og flow ind. Der blev registreret store forskelle i den omkringliggende jords hydrauliske ledningsevne for de to faskiner, selvom der kun var syv meter imellem dem, noget der havde indvirkning på faskinernes funktion. Jordens ledningsevne blev estimeret på to måder. Først ved analyse af jordprøver fra faskinens sider og bunde, derefter ved en estimering på baggrund af udsivningshastigheden fra faskinen. Den mættede hydrauliske ledningsevne varierede i målingene fra  $<10^{-8}$  til  $<10^{-4}$ , altså med ca. en faktor 10 000. Der blev estimeret at ledningsevnen var  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s for den ene faskine og knapt 10 gange mindre for den andre. Tømningstiden fra fuld faskine var på ca. fire dage. Anlægget var dimensioneret til en gentagelsesperiode på to år, men målingerne viste, at der forekom 2,7 overløb pr år, altså en gentagelsesperiode på 0,37 år. Dette blev dog ikke anset som problematisk da alt overløb blev ledt til den offentlige kloak, men der blev fremhævet, at den danske dimensioneringsstandard på dette tidspunkt var utilstrækkelig (standarden inden 1993). Der blev vurderet

at nedslivningspotentialet for regnvand i leret jord var større end først ventet, men at videre undersøgelser var nødvendige, specielt med hensyn til tilstopning af faskinen (Mikkelsen et al., 1998).

Målerudstyret gik ned i slutningen af den første projektperiode. I vinter 2009 blev vandstandsmålingerne genoptaget for en periode på fire måneder. De nye målinger viste, at den ene faskine var spærret helt af. Målingerne viste også, at den hydrauliske ledningsevne var faldet med ca. 70 % både for sider og bund, noget som indikerer en tilstopning af faskinen efter de 15 år i drift. Massebalancemodellering viste også at antallet af overløb var 4,7 pr år (Fjendbo & Hedegaard, 2009). Der blev lavet en model over tilstopningen for at lave en fremskrivning af denne og der blev vurderet, at faskinerne, i forhold til da de blev bygget, ville have overløb 10 gange så ofte efter en periode på 100 år. Dette medfører, at omtrent 60 % af det vandvolumen faskinen modtager vil gå i overløb til kloak. (Bergman et al., 2010). Der blev også vurderet, at klimaændringerne vil medføre endnu flere overløb om året, dog ikke i lige så stor grad som tilstopningen (Fjendbo & Hedegaard, 2009).

### 3.2.3.4 Opsummering

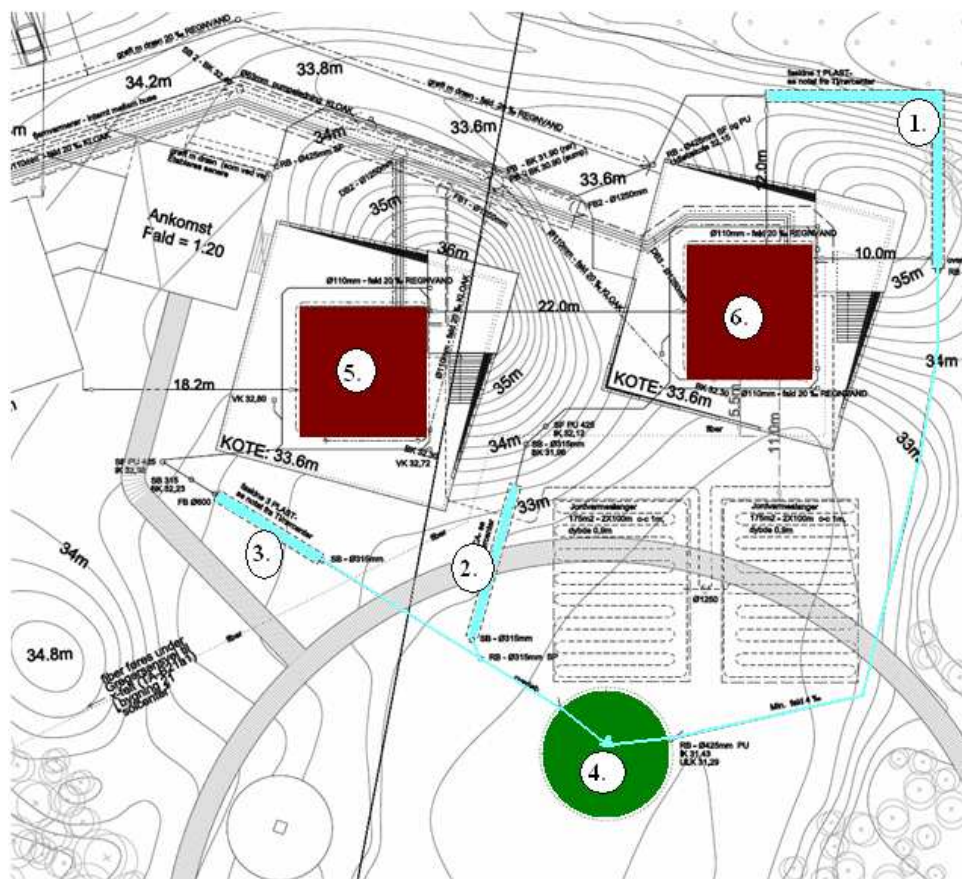
Der er nogle få undersøgelser i Skandinavien omkring faskiner i områder med leret jord og højt grundvandsspejl. Mange af undersøgelserne indikerer, at der kan være større potentiale i lerede jorder end først antaget, sandsynligvis på grund af sprækker i leret. Der er dog flere indikatorer på at tilstopning af faskinerne kan blive et problem, hvis de ikke vedligeholdes. Nogle af faskinerne har desuden været underdimensioneret. Der mangler dog stadig tilstrækkelig dokumentation på, hvordan faskiner fungerer under disse forhold, for at implementere faskiner på større basis, og videre undersøgelser er derfor nødvendigt.

## 3.3 Case: EnergyFlexHouse

EFH er ved TI som befinder sig i Høje Taastrup, som ligger vest for København, se markering på Figur 10.



Figur 10, Kort der viser hvor EnergyFlexHouse (A) befinder sig i forhold til København. Fra 'Google Earth'.



Figur 11, Kort over området ved EnergyFlexHouse. De turkise er faskinerne med overløbsrør (1,2 3), det grønne (4) er regnhaven og det røde (5, 6) er de to EnergyFlexHouse. De turkise linjer markerer overløbene fra faskinen. Det ses at alle faskiner har overløb til regnhaven.

Faskine 1 samler regnvand fra vej og ankomstplads, faskine 2 fra hus '6' og faskine 3 fra hus '5', se Figur 11. Målet med faskinerne er at indhente flere erfaringer om faskiners drift og levetid, f.eks. hvordan deres ydeevne er over længere tid og hvor hurtigt tømningstiden er. Det ønskes også undersøgt hvordan en faskine i leret jord i et område med høj grundvandstand opfører sig (19k, 2009a).

For at indsamle mest mulig dokumentation blev faskinerne bygget, så der kan måles vandstand, flow, udtages vandprøver samt foretage visuel inspektion af faskinerne med videokamera (19k, 2009b). Af samme grund er hver af de tre faskiner af forskellige materialer. Nummer et er af plastikkassetter af type Qubic fra Wavin og nummer to af faskineposer med Leca, fra Saint-Gobain Weber. Nummer tre er af plastikkassetter af typen RIGO-Fill i fra Nyrup plast A/S (19k, 2009b; 19k, 2008). Nr. tre er faskinen der bliver beskrevet i denne opgave, og vil herefter bare blive benævnt 'faskinen'.

### 3.3.1 Jordbundsforhold og grundvandstand

Inden faskinerne blev anlagt blev der i 2008 foretaget jordbundsundersøgelser af området omkring EnergyFlexHouse af Borgselius Anlægs og Geoteknik. Der blev forsøgt at gennemføre en nedsivningstest, men dette var ikke muligt, da vandstanden blev ved med at stige på grund af den høje grundvandsstand (19k, 2008). Senere undersøgelser viste, at faskinen ikke ville ligge under grundvandspejlet på grund af dens placering (19k,2009b). Grundvandstanden blev målt i august til at være ca. 0,5 meter under terræn, mens tidligere undersøgelser har vist en grundvandstand mellem 0,95 og 2,5 meter under terræn. Der blev

derfor taget højde for et relativt højt grundvandsspejl og et grundvandsspejl med store variationer når faskinerne blev dimensioneret (19k, 2008).

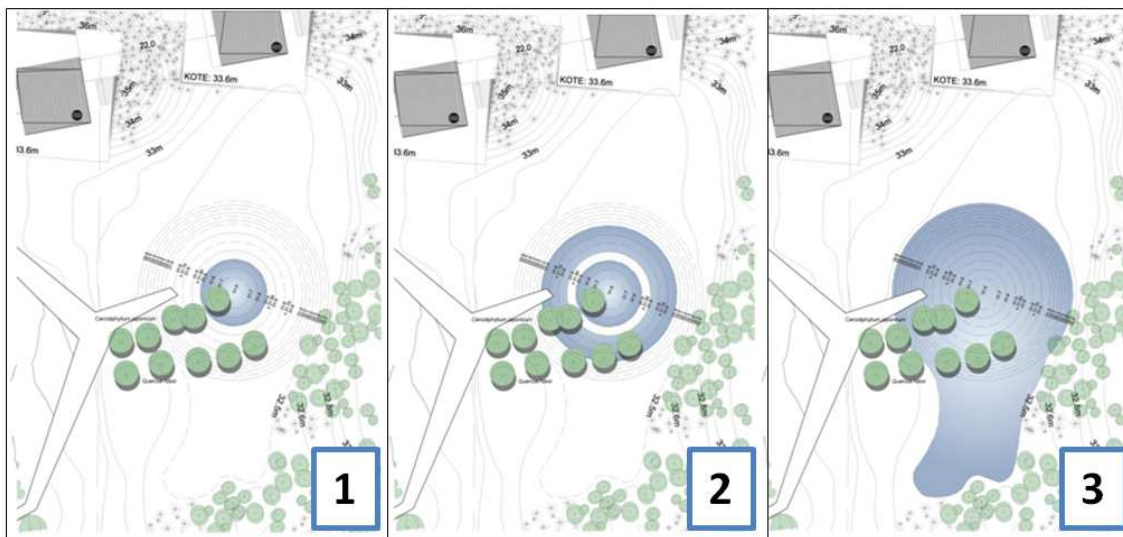
Der blev foretaget flere boringer for at estimere jordens hydrauliske ledningsevne ved faskinerne. Jordbundsforholdene blev fundet til siltet ler ved faskine nr. 1 og sandet ler ved faskine 2 og 3. Den hydrauliske ledningsevne blev på baggrund af dette skønnet til  $10^{-6}$  m/s ved alle tre faskiner (19k, 2008).

### 3.3.2 Regnhaven

Regnhaven er anlagt for at indsamle erfaringer om regnhavers drift og hvad for en flora, der bedst vil passe i et regnhave-miljø. En regnhave er en forsækning i en have, der vil kunne have varierende vandstand og også være helt tør, alt eftersom hvad nedbørsmønstret tillader (19k, 2009a). Regnvandet kan derefter enten nedsive eller fordampe fra regnhaven.

Regnhaven er opbygget så den vil se forskellig ud alt efter over hvor meget vandvolumen den indeholder. Regnhaven består af tre zoner der ligger udenfor hinanden. Oftest vil der stå regnvand i det indre af regnhaven, zone 1, som er et ca. 30 m<sup>2</sup> stort bassin med en relativt impermeabel bund (se Figur 12, scenarie nr. 1). Efter større regnskyl vil der også være en ring af vand udenfor zone 1, denne ring er zone 2 og har et areal på 100 m<sup>2</sup>, se scenarie nummer 2, Figur 12. Ved ekstremnedbør vil vandet kunne fylde regnhaven helt op og eventuelt også et mindre område lige omkring regnhaven (zone 3, se scenarie nummer 3, Figur 12). Både zone 2 og zone 3 har et underlag der fremmer nedsivning (19k, 2009b).

På grund af ønsket om erfaringer med regnhaver har det været vigtigt at have hyppige overløb fra faskinerne og derfor er faskinerne bevist blevet dimensioneret efter dette.

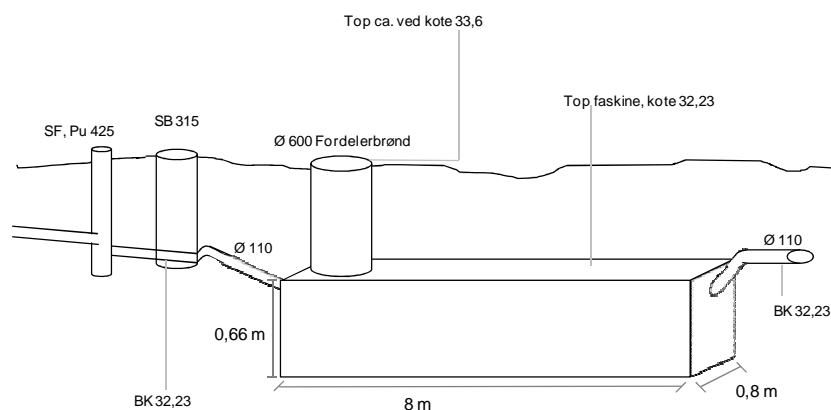


Figur 12, Scenarier for regnhave ved EFH. Fra venstre, scenarie:

- 1.) Ved lidt regn, regnhaven er lidt fyldt (zone1),
- 2.) Ved meget regn er regnhaven mellemfyldt (zone 1-2) ,
- 3.) Ved ekstremregn er regnhaven fyldt helt op og desuden er der til nød kapacitet til ekstra vand omkring regnhaven (zone 1-3). (19k, å.u.)

### 3.3.3 Dimensioneringen af faskine nr. 3

Faskinen blev i januar 2009 dimensioneret til  $6,48\text{m}^3$  med en gentagelsesperiode for overløb på  $T=0,1$  år. Den høje overløbsfrekvens blev valgt da der ønskedes en del vand i regnhaven og da det skulle være muligt at måle på faskinen og regnhave. Dimensioneringen blev udført af Maria Bergman fra DTU Miljø efter metode beskrevet i afsnit 3.2.2 efter nedbørsdata fra Glostrup (Bergman, 2009). Faskinens volumen blev bestemt till  $x \times h \times b = 5,4 \times 1,2 \times 1\text{m}$ , det vil sige  $6,2\text{m}^3$  (porøsitet=0,95). Der var dog store usikkerheder omkring den hydrauliske ledningsevne på dette tidspunkt. Efter dimensioneringen blev byggeplanerne lavet om. Det blev besluttet, at der skulle bygges to og ikke tre huse, og faskinen skulle dermed kun modtage vand fra  $400\text{m}^2$  befæstet areal i stedet for  $625\text{m}^2$ . Volumen af faskinen blev derfor skønnet til at skulle være, på grund af de store usikkerheder,  $4\text{m}^3$  (appendiks i). Til faskinen var det besluttet at benytte plastkassetter af typen RIGO-Fill fra Nyrup, med dimensionerne  $l \times b \times h = 0,8 \times 0,8 \times 0,66$ , og en porøsitet på 95 % (appendiks xii). Da faskinen skulle være så lang og smal som mulig jfr afsnit, blev kassetterne placeret efter hinanden og faskine fik dermed dimensionerne  $l \times b \times h = 8 \times 0,8 \times 0,66\text{m}$ , skitse af faskinen kan ses i Figur 13. Da det var meget vigtigt at der skulle kunne måles på faskinen blev det første faskineelement erstattet med et 'Nyrups Quadro-control' element som gør det muligt at inspicere og spule faskinen (appendiks xii). Quadro-control elementet og faskinen kan ses på Figur 14.



Figur 13, Skitse af faskine nr. 3, tegningen er ikke målfast. Læg mærke til at overløbet er konstrueret således at der først sker overløb når vandstanden er på højde med faskinens toppunkt.

Alle produkter fra Nyrup plast er VA-godkendte, dette betyder at de lever op til rørcenteranvisning nr. 003, "brug af regnvand", og bygningsreglementet (Nyrup plast a/s, 2010).





Figur 14, Fotografi af faskine nr. 3 under anlæggingen (19k, 2009d).

### 3.3.4 Online monitoreringsudstyr

Efteråret 2009 blev der opsat måleudstyr ved faskinen. Dette udstyr var en regnmåler, en vandmætningsgradsmåler, tre vandniveaumålere og to flowmålere. For oversigtskort over målerudstyret, se Figur 3 i afsnit 2, samt Figur 15. Det målerudstyr der er benyttet til data i denne opgave, er yderligere beskrevet i det følgende afsnit. Data fra vandmætningsgradsmåleren blev ikke benyttet i denne opgave på grund af tekniske og tidsmæssige begrænsninger.



Figur 15, Opsætningen ved faskinen. Fra venstre: regnmåleren står foran skabet til ledningerne og loggere, til højre for skabet ses en grå cirkel der er betonlâget til faskinebrønden. Foran den grå cirkel og lidt længere fremme i billedet til højre ses to hvide plastikrør der er toppen af de to grundvandsbrønde.

#### 3.3.4.1 Vandniveau

Vandstanden i faskinen og den nærliggende grundvandstand blev logget hvert minut med trykstransducere fra Ørum & Jensen elektronik A/S. En trykstransducer har en membran der vil bue ind efter hvor stort tryk den bliver udsat for. Dette mekaniske signal kan oversættes til et elektrisk signal, som så bliver omsat via tryk til vandstand, da atmosfærisk tryk bliver målt ved overfladen (Teknologisk institut, 2010). De to målere til grundvandsbrøndene var af samme type, SH 3500, som er cylinderformede og med en radius på 19 mm (Ørum & Jensen elektronik A/S, 2010a). I faskinen er trykstransduceren model 3100, som er en lidt større og billigere model (Ørum & Jensen elektronik A/S, 2010b), da der er større plads i faskinebrønden. Alle trykstransducerene blev automatisk atmosfærekompenseret.

#### 3.3.4.2 Flow

Flowmålerene er af typen 'ISCO 2150 Area Velocity Flow Module', der måler gennemsnitshastigheden af vandet ved hjælp af ultralyd, og samtidig måler vanddybden med en trykstransducer (ISCO, 2010a). Da geometrien af røret der måles i er kendt, og ud fra antagelsen om en stationær strømning, kan flowet udregnes. Det er vigtigt, at der findes tilstrækkelig mange partikler eller luftbobler i vandet til at reflektere ultralydsbølgerne. Alt for rent vand kan derfor være problematisk at måle i, på grund af manglen på partikler. Der kræves også et roligt og frit vandspejl for at målingerne skal være korrekte (Teknologisk institut, 2010). Flowmåleren skal hele tiden være dækket af mindst 2,5 cm vand for at måle korrekt.

Vandstanden har, ifølge producenten, en måleusikkerhed på  $\pm 0,003$  m i intervallet 0,01-3,05 m.

Hastighedsmålingerne har en usikkerhed på  $\pm 0,03$  m/s mellem -1.5 og 1.5 m/s, og en  $\pm 2$  % usikkerhed

mellem 1,5 og 6,1 m/s. (ISCO, 2010a). Flowet blev logget hvert minut frem til marts, hvorefter der kun blev logget hvert femte minut, efter problemer med modemmet.

#### **3.3.4.3 Nedbør**

Nedbør blev målt lige ved indløbet til faskinen med regnmåleren '*YOUNG Tipping Bucket Rain Gauge, model 52202*'. Denne model har et vippekar der kan rumme 0,1 mm og et opsamlingsareal på 200cm<sup>2</sup>, og opfylder hermed specifikationen fra 'World Meteorological Organization' (YOUNG, 2010). Modellen er med opvarmning, men da der ikke var tændt for denne, ville kun relativt små snefald kunne måles. Generelt er det også meget kompliceret og forbundet store fejlkilder med at registrere snefald ved hjælp af regnmålere (Dingman, 2002).

Nedbøren blev logget hvert minut. Producenten opgiver, at regnmåleren har en målesikkerhed på 2 % på nedbørsintensiteter op til 25mm/time, og på 3 % op til 50 mm/time (YOUNG, 2010).

#### **3.3.4.4 Loggere og online data**

Et '*2105 Network Interface*' Moduler blev benyttet til at logge data fra regnmåleren (ISCO, 2010b) Flowdata blev logget i sin egen enhed og '*Aquamonitor*' blev benyttet til at logge data fra vandniveaumålerne. Både *Aquamonitor* og 2105 modulet indeholdt et modem så data kunne hentes ved opkald, data fra flowmålerne blev hentet gennem 2105 modemmet. Modemmen blev ringet op af DHI hver morgen kl 06:00 og data blev derved lagt ind i deres database. Data kunne så tilgås via programmet 'DIMS' fra DHI, og kunne ekstraheres fra det samme program til Excel.

#### **3.3.4.5 Problemer med målerudstyret**

Flere gange i projektfasen var der problemer med målerudstyret, specielt med modemmen. Fra projektets start ville modemmet i 2105 modulet ikke besvare opkald. Det viste sig, at der var noget galt med dette modul, derfor blev det sendt til USA for reparation. For at miste mindst mulig data, og da logning af data hver minut ikke ansås som nødvendigt, blev flowmåleren indstillet til at logge hvert femte minut i stedet for hvert minut. På denne måde blev der sparet på lagerpladsen så længe der ikke var modemforbindelse. Der blev anskaffet et modul 2105 til låns, som blev installeret den 23. marts 2010. I perioden, hvor der ikke var noget 2105 modul, blev der ikke logget noget nedbørsdata. I perioden med 2105 modul-problemerne gik nogle flowdata også tabt, da der ikke var nok hukommelse.

Senere var der problemer med vandniveaudata. Dette skyldes i første omgang sandsynligvis en løs forbindelse, men nøjagtig hvor denne befinder sig er ukendt. Grunden til, at der antages at være en løs forbindelse er, at da data for vandniveauerne for en periode i maj ikke kom ind i 'DIMS', blev problemet løst da der blev rodet rundt i ledningerne i skabet. Nye problemer med vandniveaudata opstod da

batteriopladerens ledning til Aquamonitors modem uagsomt blev uagtsomt trukket ud den 3. maj 2010. Dette medførte, at batteriet løb tør for strøm den 29. maj 2010 og vandniveaudata ikke kunne hentes. Fejlen blev opdaget den 1. juni, og batteri blev sat til igen. Efter opladningen ville modemmet stadigvæk ikke besvare opkald. Efter et stykke tid blev der fastslået, at dette skyldtes, at modemmet var gået tilbage til fabriksindstillingerne om ikke at besvare opkald, da der var løbet tør for strøm, modemmet blev derfor omprogrammeret den 10. juni. Nogle vandniveaudata for perioden de sidste dage af maj og den første juni er derfor gået tabt.



## 4 Metode

### 4.1 Feltarbejde

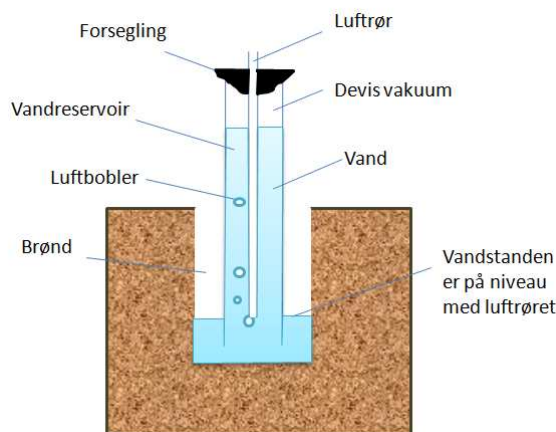
I felten blev der målt hydraulisk ledningsevne, vandniveau i brønde og faskine, højdeforskel mellem faskine og brønde og afstanden mellem faskine og brønde. Feltarbejdet blev udført i perioden 5. marts 2010 til 8. juni 2010. Stedet blev også besøgt flere gange for at rette op på problemerne med at hente de online monitorerede data (se detaljer i afsnit 3.3.4.5)

For at justere vandhøjden i faskinen og grundvandsbrønden fra de monitorerede data, var det nødvendigt at pejle vanddybden i faskine og brønde. Yderligere var det nødvendigt at opmåle længde og højdeforskellen fra faskinen til de to brønde. Højden blev målet med et nivellerinstrument og aflæst på en lodretstillet målestok der kaldes 'stadie'. Længden blev målt med et målebånd. Den hydrauliske ledningsevne,  $K_{fs}$ , blev målt ved hjælp af et permeameter.

#### 4.1.1 Permeameteret

Permeameteret består af lufttæt vandreservoir med to kamre og et luftrør indeni reservoiret. Se Figur 16 for illustration af permeameteret, for enkelhedens skyld er kun et reservoirkammer indtegnet.

Permeameteret placeres på et trebenet stativ i en brønd boret i jorden. Både luftrøret og reservoiret er med en målestok i mm så deres vandhøjde kan aflæses. Luftrøret bruges til at bestemme vanddybden i brønden. (Solimoisture equipment corp, 2005).



Figur 16, Illustration af hvordan permeameteret fungerer, trykket af vandet og det delvise vakuum i reservoiret tilsvare trykket af atmosfærisk luft jævnfør mariotte princippet. Vandstanden i brønden vil derfor, på grund af luftrøret, konstant være på det samme niveau som luftrøret.

Permeameteret fungerer efter 'mariotte' princippet og dets reservoir fyldes til start helt op med vand. Et energiniveau, altså en vandstand, indstilles ved at trække det indre luftrør op. Vandstanden i brønden vil hermed indstilles på højde med luftrørets bund. Når vandstanden falder i reservoiret vil der dannes et delvis vakuum i toppen af reservoiret. For at opretholde atmosfærisk tryk i reservoiret vil atmosfærisk luft, gennem luftrøret, boble igennem reservoiret. Denne luft kan så delvis erstatte vakuummet i toppen af

reservoiret og den mængde vand der tilsvarer denne trykforskel vil derfor strømme ud af reservoiret. Højden af luftrøret skal indstilles på et bestemt vandhøjde, og vandstanden i brønden vil dermed være konstant (Solimoisture equipment corp, 2005). Hermed kan der aflæses på reservoiret, hvor meget vand jorden suger til sig. Ved at foretage denne aflæsning men jævne tidsintervaller vil det til sidst ses at jorden suger vandet til sig med en konstant rate (=R) og dermed kan det antages at jorden i et område omkring brønden er mættet. Hastigheden hvormed vandstanden falder, benyttes til at finde flowet ind i brønden, Q, (Solimoisture equipment corp, 2005).

$$Q = X R \quad 13.)$$

(Solimoisture equipment corp, 2005)

Hvor X er en konstant, der afhænger af om der kun benyttes den langsomme eller hurtige tømningstid for permeameteret. Dette indstilles ved, at der kun vælges det inderste (X=2.16) eller både det inderste og yderste reservoir (X=35.22). På grund af jorden ved EFH har lav permeabilitet blev kun det inderste reservoir benyttet.  $K_{fs}$  kan så findes ved formel nummer 9.) i afsnit 3.1.3.4.  $\alpha^*$  blev estimeret ud fra tabel i operating instructions if. Elrick et al. 1989) til 0,04 /cm. Tabellen er gengivet i appendiks ii sammen med formlene til at den tilhørende C-værdi.

Permeameteret blev opstillet et par meter væk fra faskinen. Denne afstand blev skønnet ud fra at målingerne skulle foregå så tæt på faskinen som muligt på grund af jordens mulige heterogenitet. Samtidig skulle den ekstra tilførsel af vand helst ikke foregå for tæt på faskinen. Hullet der blev boret til permeameteret var ca. 40 cm dybt hver gang.

Med permeameteret er det muligt at måle infiltrationsraten til jorden med to forskellige vandniveauer/energiniveauer i den samme brønd. Dette gøres ved at indstille et nyt og højere vandniveau end det første efter den første måling. To vandniveauer målt i den samme brønd til at beregne  $K_{fs}$  indebærer dog, at resultatet kan blive negativt på grund af jordens heterogenitet. Det anbefales derfor at benytte et gennemsnit af to eller flere målinger, men alle i forskellige brønde (Elrick & Reynolds, 1992). Der blev derfor besluttet at benytte én vandstand for hver boring. Kun en enkelt måling vil indebære en usikkerhed på en faktor to til tre som maksimum. Taget i betragtning den hydrauliske ledningsevnes store størrelsesvariation, samt jordens lokale variationer og heterogenitet, er denne usikkerhed acceptabel (Elrick & Reynolds, 1992).



Figur 17, Permeameterets reservoir fyldes med vand inden forsøget.

#### 4.1.2 Pejling og nivellering

Pejlingen blev foretaget fra grundvandsbrøndenes kant, og faskinens fordelerbrønds kant. Plastikkanten omkring fordelerbrønden var en lille smule skæv, så der blev nivelleret ud fra det samme punkt som der blev pejlet. Grundvandsbrøndenes rør havde en såpas lille radius, at det var tilstrækkeligt at nivellere fra deres top. For at reducere usikkerheden blev der nivelleret fra to punkter i terrænet, begge ca. 5-10 meter fra faskinen og brøndene.

Ved pejlingen blev tidspunktet noteret, så der kunne aflæses vanddybde af data. Da data logges hvert femte minut valgtes det at aflæse data for ca. 10 minutter inden det noterede tidspunkt så hævingen af trykstransducerne under målingen over vandoverfladen ikke skulle påvirke den aflæste vanddybde. Det antages, at vandstanden ikke ændrer sig nævneværdig på disse 10 minutter. Dette er da nedsivningen sker langsomt og da der blev observeret, at faskinen ikke var helt fyldt, altså ingen flow ud, og da der ikke var observeret regn indenfor de sidste timer, altså ingen flow ind.

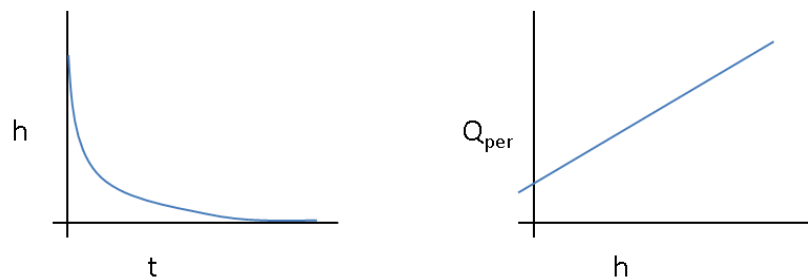
Både landmålingen og pejlingen estimeres til at have en usikkerhed på 1-2 cm (pers. kom. Skov, 2010).

#### 4.2 Matematisk modellering

Der blev benyttet to matematiske modeller. Den ene var en sænkingsmodel, der beskriver hvordan vandspejlet i faskinen synker, og denne model blev benyttet til at estimere den hydrauliske ledningsevne omkring faskinen. Den anden var en model baseret på faskinens massebalance og som, med nedbør som input, simulerede faskinens funktion.

Begge modellerne er baseret på antagelsen om at nedsivningen fra faskinen kun er afhængig af det beskyllede areal,  $A_b$ , altså de flader der kan ske en perkolation ud af. Udsivningen bliver hermed en funktion

af vandspejlets højde. Dette giver et eksponentielt fald i vandspejlet over tid, da perkolationen,  $Q_{per}$ , både er funktion af vandspejlet og af vandspejlsændringen over tid, se Figur 18.



Figur 18, Vandspejlet i faskinen som funktion af tiden (venstre) og infiltrationen som funktion af vandstanden i faskinen (højre), som det ideelt ville se ud ifølge modellen..

Det antages videre, at jorden er homogen og isotropisk. Dette er en stærk forsimpelse selvom det drejer sig om et lille område, da specielt lerjorde har store variationer i hydraulisk ledningsevne, og at en lagdeling nok er tilfældet. Påvirkninger fra temperatursvingninger på jord og vand er heller ikke medtaget i denne model, da disse anses for at være minimale. Alle disse antagelser gælder også når den hydrauliske gradient blev udregnet.

#### 4.2.1 Massebalancemodellen

I massebalancemodelleringen antages det, at der sker en udsivning både gennem bund, sider og endeflader. Det virker usandsynligt af faskinen vil være helt stoppet til efter en så kort driftsperiode, derfor tages bunden med. Selvom endefladerne ikke fylder meget af det beskyllede areal er de alligevel med, specielt hvis der skal modelleres over en kortere periode og specielt da faskinen ikke helt opfylder betingelserne om at være en rendefaskine, altså  $l \gg b$ .

Fælles for tidligere modeller af faskiner er, at det antages at der sker en mættet strømning mellem faskinen og grundvandspejlet (Ducehne et al., 1994; Mikkelsen & Jacobsen, 1993). Hermed bliver infiltrationsraten lig med den hydrauliske ledningsevne og dermed kan Darcys lov benyttes. Darcys lov bliver yderligere forsimplet til

$$Q = K_s A_b \quad 14.)$$

da der sættes en enhedsløs hydraulisk gradient ( $dh/dl=1$ ) jævnfør argumentationen i afsnit 3.1.3.3. Faskinens beskyllede areal,  $A_b$ , er lig med:

$$A_b = ((2 l dh) + (2 b dh) + (l b)) \quad 15.)$$

Hvor  $dh$  er forskellen i vandstanden i faskinen over tiden  $dt$ . Hvis der antages en forskel i udsivning gennem bund og sider vil dermed perkolationen i fra faskinen  $Q_{per}$  være:

$$Q_{per} = (K_{side} 2 (l + b) dh) + (K_{bund} l b) \quad 16.)$$

(Ericsson 1978, if. Mikkelsen & Jacobsen 1993)

Nedbør lige over faskinen samt transpiration og evaporation medregnes ikke i modellen da det kan antages at disse faktorer vejer op for hinanden og deres påvirkning på faskinen må anses for at være minimal

(Duchene et al., 1994). Dermed kan der regnes med at der kun kommer vand ind til faskinen fra indløbet og at vandet kun kan gå ud af faskinen gennem perkolation eller overløb. Massebalancen bliver hermed:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{ind} - Q_{over} - Q_{per} \quad 17.)$$

Hvor  $Q_{ind}$  er vandet der kommer ind gennem indløbet,  $Q_{over}$  er vandet der forlader faskinen gennem overløbet.  $Q_{ind}$  er givet ved den simple afstrømningsmodel beskrevet i afsnit 3.1.2 med en  $C$  estimeret ud fra de monitorerede data og en  $A = 400\text{m}^2$ . Massebalancen blev omgjort til en diskret differentiallyingning til beregning af vandvolumnet et tidsskridt frem i tid:

$$V(t + \Delta t) = V(t) + \frac{\Delta V}{\Delta t} \Delta t = V(t) + (Q_{ind} - Q_{over} - Q_{per})\Delta t \quad 18.)$$

Med nedbør og en startvandstand som input kunne faskinens flow ind, vandstand og overløb simuleres i Matlab. Da overløbet var konstrueret således, at der ville ske et overløb når vandstanden var i faskinens topkote, blev der simuleret overløb når faskinens vandstand var på 0,66m. Der blev taget højde for at perkolationen ikke kunne overskride det genværende vandvolumen. Koden findes i appendiks iii. En kontrol af massebalancen kan foretages ved at summere alle flows op og derefter sammenligne om dette tilsvarende den målte volumenændring i det pågældende tidsinterval.

#### 4.2.2 Sænkingsmodel

Ud fra de monitorerede data for vandspejlsænkningen i faskinen blev den hydrauliske ledningsevne estimeret. Sænkingsmodellen består i at analysere hændelser, hvor der hverken er registreret flow ved indløbet eller overløbet. I følge den opsatte massebalance vil det således kun være nedsivning der påvirker vandstanden i faskinen. Den følgende sammenhæng gælder således ud fra massebalancen:

$$Q_{per} = -\frac{dh \ l \ b \ \varphi}{dt} \quad 19.)$$

$Q_{per}$  kan derfor beregnes ud fra differencen i vandspejlsænkningen i to tidsskridt, divideret med tidsskridtet og multipliceret med faskinens dimensioner. Samtidig gælder ligning nummer 16.) for  $Q_{per}$ , denne kan omskrives til:

$$Q_{per} = \alpha h + \beta \quad 20.)$$

Hvor

$$\alpha = K_{side} \ 2 \ (l + b) \quad 21.)$$

$$\text{og } \beta = K_{bund} \ l \ b. \quad 22.)$$

Den hydrauliske ledningsevne for bund og sider kan dermed findes ud fra henholdsvis hældningen  $\alpha$  og skæringen med y-aksen  $\beta$  for den lineære regressionslinje for  $Q_{per}$  plottet i mod  $h$ . Da der benyttes en vandspejlsforskel mellem to tidspunkter til at finde  $Q_{per}$ , blev gennemsnittet af disse to vandstande benyttet som den  $h$   $Q_{per}$  blev plottet i mod.

#### 4.2.3 Faskinens kapacitet

For at finde faskinens kapacitet ønskedes det at simulere, hvad der ville ske ved en dimensionsgivende regnhændelse. Da det af tidsmæssige begrænsninger ikke var muligt at simulere historiske nedbørsserier i

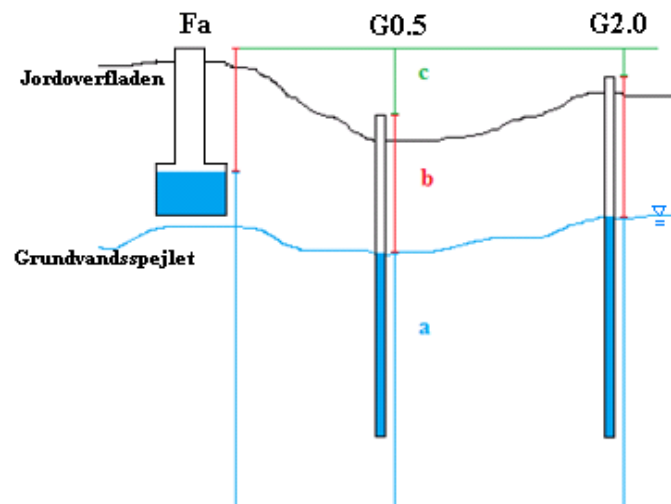
massebalancemodellen for derefter at se antallet af overløb dette resulterede i, blev der valgt at simulere CDS regn med  $T=10$  år. Kasseregn blev ikke benyttet da CDS regn blev anset for mere nøjagtigt og pålideligt (se afsnit 3.1.4). Hydrografen for CDS regn for den givne gentagelsesperiode for det givne område blev optegnet og der blev grafisk fundet, hvor meget vand der gik til overløb. Dette blev gjort ved at trække nedsivningen fra og når vandvolumnet til CDS regnen overskred faskinens volumen blev der antaget at den resterende regn gik direkte i regnhaven. Selvom dette ikke giver et indtryk af, hvad flere følgende hændelser vil have at sige, kunne det alligevel give en indikation af faskinens kapacitet og hvordan systemet ville reagere ved en ekstrem nedbørshændelse.

## 5 Resultater og diskussion

### 5.1 Verificering af data

#### 5.1.1 Vandniveau

Ud fra de foretagne nivelleringer og pejlinger blev de online monitorerede vandniveauer kote justeret. Pejlingerne foregik på to forskellige tidspunkter, nivelleringen kun på et. Alle tre brønde blev pejlet. På grund af at udstyret var relativt slidt skulle der den 3. maj ventes mindst en halv time mellem hver pejling. Pejlingen for G2.0 i juni er af samme grund relativt usikker fordi her holdt pejleren op med at fungere.

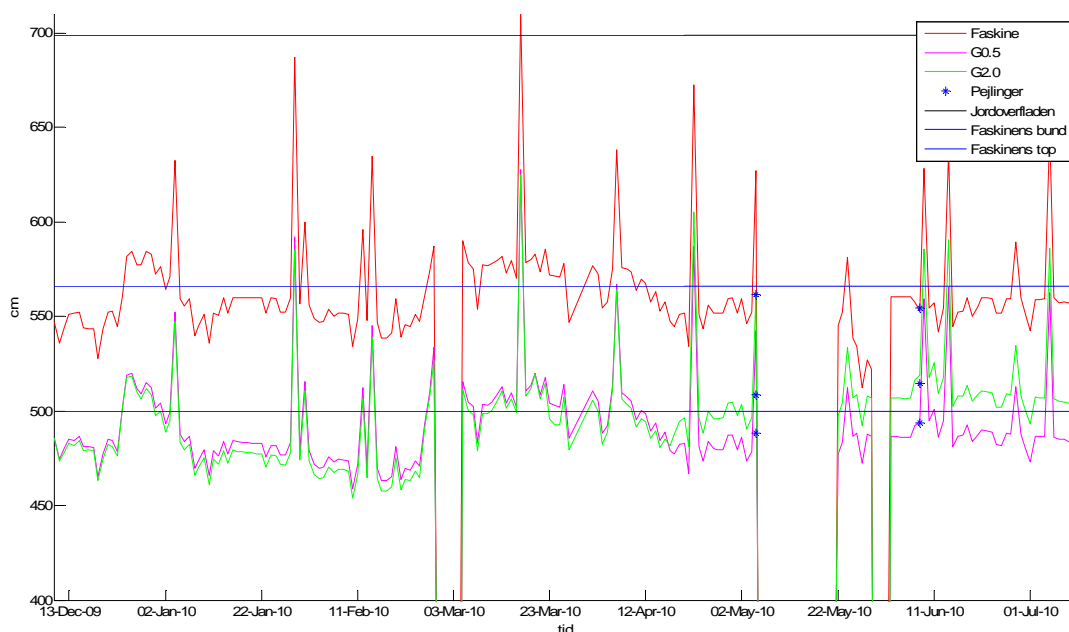


Figur 19, Ikke målfast illustration der illustrerer hvad 'a', 'b' og 'c' er. Fa står for faskine. Fordelerbrønden til faskinen er også indtegnet, hvor det var toppen af denne der blev benyttet som udgangspunkt.

Vanddybden 'a' blev fundet ved at 'c' var nivelleret og 'b' var pejlet, se Figur 19 og eventuelt appendiks iv. Det blev for tydelighedens skyld valgt at gøre kote 0 til bunden af faskinen. Ud fra monitorerede data 10 minutter inden pejlingerne blev konstanten  $N_a$ , bestemt, der skulle lægges til eller trækkes fra de monitorerede rådata for at få vandniveauene i absolutte koter. Der blev benyttet et gennemsnit af de to pejlinger.  $N_a$  var -2cm, -105cm og -115cm for henholdsvis faskinen, G0.5 og G2.0. Forskellen i den resulterende  $N_a$  og resultatet fra de enkelte pejlinger var for faskine og G0.5 på 0 % og for G2.0 på 3 %, altså meget lille. Værdierne for  $N_a$  kan ses i Tabel 2 og et plot af de justerede vandniveauer for hele perioden kan ses i Figur 20.

Tabel 2, tabel med  $N_A$ , konstanten der skulle lægges til eller trækkes fra de monitorerede rådata for at få vandniveauene i absolute koter med faskinens bund som udgangspunkt. De justerede koter til tidspunkterne der blev pejlet, sammen med tidspunktet, er også med.

	Faskine	G0,5	G2,0
$N_A$ [cm]	<b>-2,00</b>	<b>-105</b>	<b>-115</b>
<b>3. maj</b>			
Tidspunkt	10:54	13:16	15:00
Vanddybde pejlet[cm]	<b>61,7</b>	<b>-11,85</b>	<b>8,5</b>
<b>8. juni</b>			
Tidspunkt	18:24	18:28	18:28
Vanddybde pejlet[cm]	<b>54,7</b>	<b>-6,35</b>	<b>14,5</b>

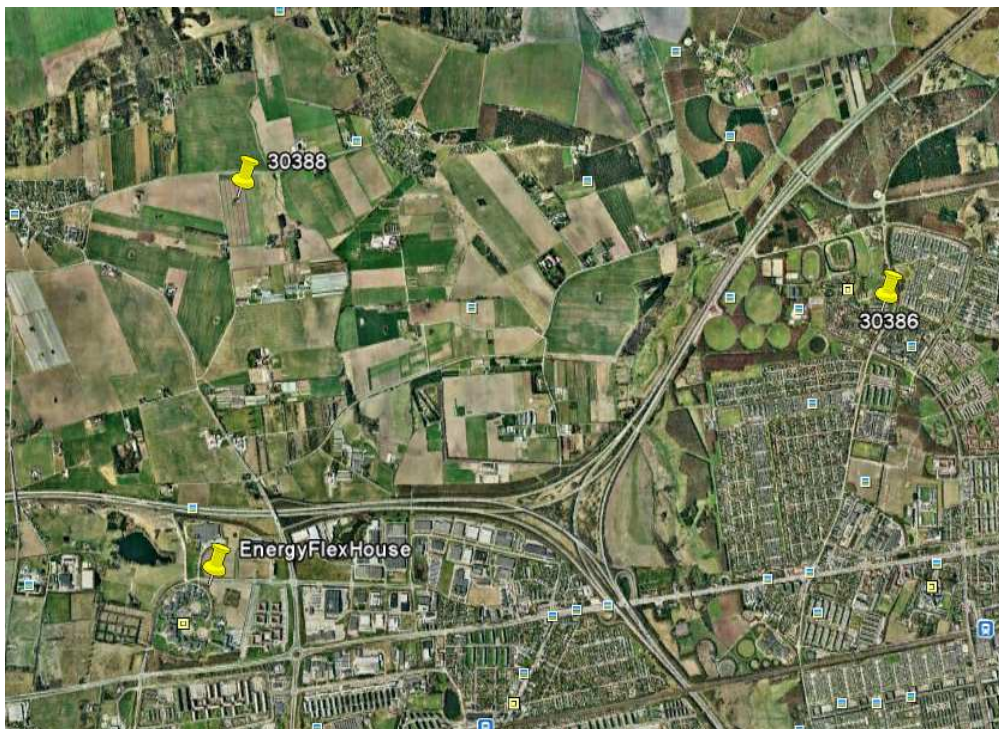


Figur 20, Vandniveauer, gennemsnit af dagsværdier fra 10. december til og med 10. juli. Pejlingerne er markeret med blå stjerner. Kote 500 er faskinens bund, se markering på figuren.

### 5.1.2 Nedbør

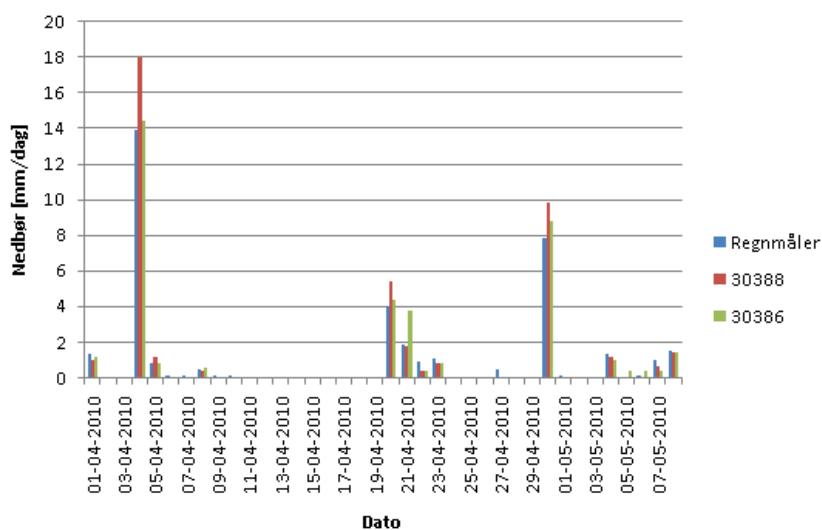
Regnmåleren blev kontrolleret op mod to af Spildevandskomiteens (SVKs) regnmålere i nærheden. Nummer 30388, Høje Taastrup, ligger ca. 2,5 km væk, mens nummer 30386, Albertslund Materialelegård, ligger ca. 4,5 km væk. Positionerne til nedbørsmålerne blev plottet i 'Google Earth' ud fra længde og breddegrader fra DMI fra Nielsen (2001), se kort på Figur 21.



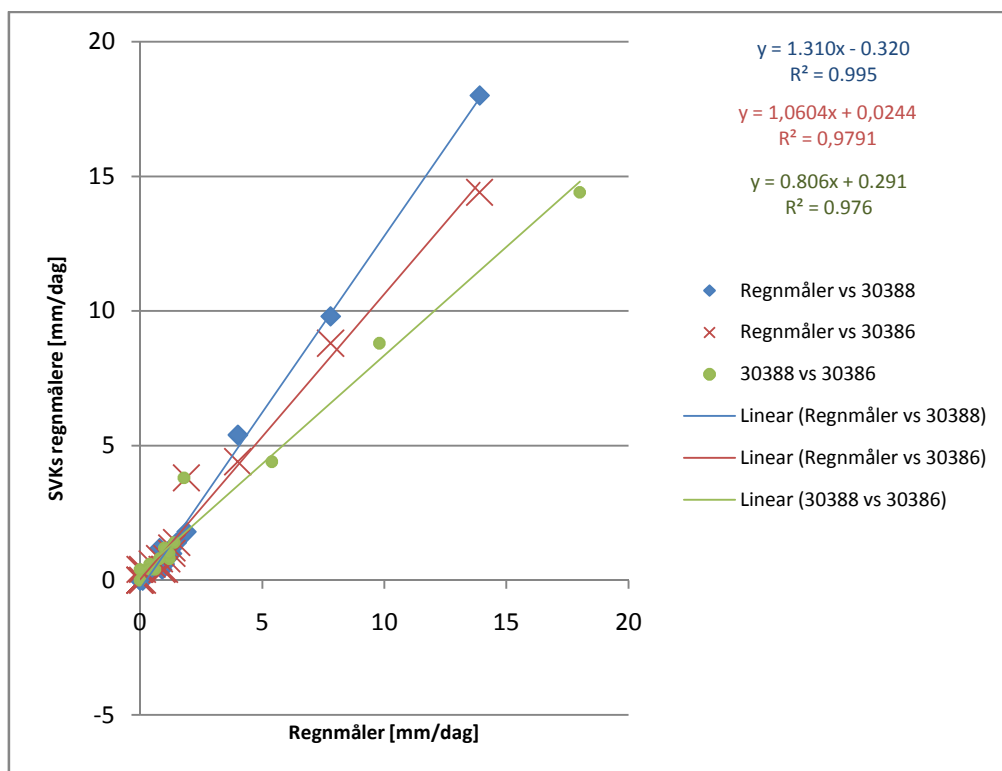


Figur 21, Kort over de to regnmålere og EnergyFlexHouse, skala 1:50 000. Udklip fra 'Google Earth'

Data for SVKs regnmålere var skaffet for december 2009 til midten af maj 2010. Da der den pågældende vinter faldt unormalt store mængder nedbør som sne, blev kun data fra april og maj sammenlignet med regnmåleren. Der er til tider registreret en lavere temperatur end 1,5°C i disse perioder, noget der betyder at nedbøren kan have faldet som sne. Da der normalt ikke er sne i Danmark i april-maj, og da der i tillæg ikke blev observeret nogen sne i København på dette tidspunkt, antages derfor at al nedbør faldt som regn.



Figur 22, Regnmålerenes opsamlede nedbør plottet mod hinanden. 'Regnmåler' er regnmåleren ved EFH, de to andre regnmålere er SVKs regnmålere benævnt med deres nummer.



Figur 23, Lineær regressionsanalyse af regnmålerne. 'Regnmåler' er regnmåleren ved EFH, de to andre regnmålere er SVKs regnmålere benævnt med deres nummer.

Det ses, af Figur 22 og Figur 23, at der generelt er en meget god sammenhæng mellem regnmåleren ved EFH og de to målestationer. En mindre variation er også forventet, da nedbør ofte falder meget lokalt og på grund af afstanden mellem målestationerne. Dette kan ses af at mellem 30386 og 30388 er  $R^2=0,976$ , altså er de ikke fuldstændig ens. Nedbøren er faktisk mere ens både mellem regnmåleren ved EFH og 30386, hvor  $R^2=0,979$ , og for EFH og 30388, hvor  $R^2=0,995$ , end mellem SVK's to regnmålere. Ingen af disse forskelle er dog væsentlig store.

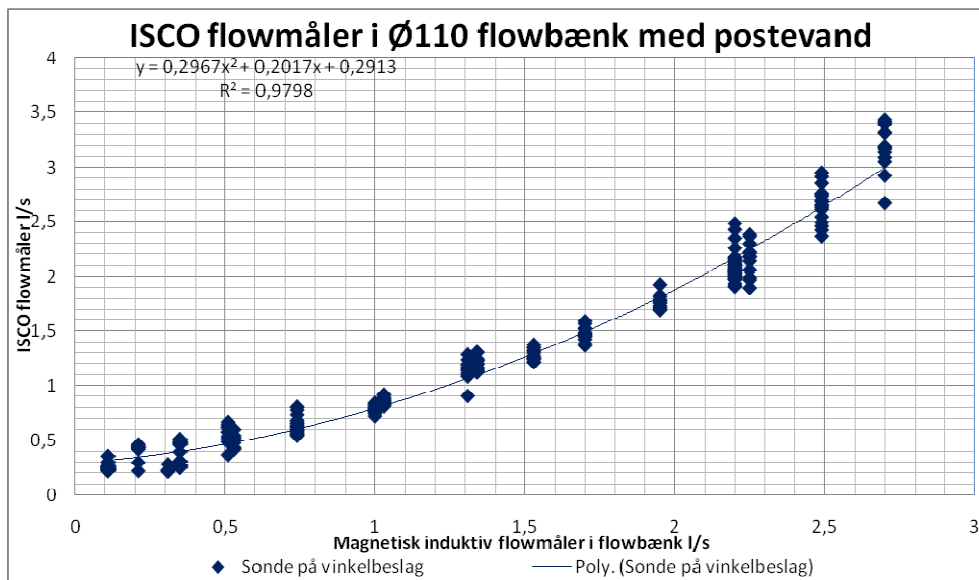
SVKs regnmålere har alle sammen opvarmning til at smelte eventuel sne, men samtidig er de ikke specielt gode til at opfange sne. Dette skyldes at SVKs regnmålere er designet til ekstreme intensiteter og en præcis volumetrisk registrering af nedbør. Dette indebærer også at regnmålerne ikke er særligt gode til at opfange nedbør med relativt lave intensiteter (pers. kom. Arnbjerg-Nilsen, 2010). Dette stemmer godt overens med Figur 22, da de mindste regnhændelser ved EFH (5., 7. og 27. april og 1., 6., 9., 10., 14. maj) ikke svarer til nogen værdier fra målestationerne. Muligvis er noget nedbør, der er faldet som sne, hverken opfanget af regnmåleren ved EFH eller SVKs målere, da begge målere generelt er dårlige til at opfange sne. Dette kan dog hverken bekræftes eller afkræftes af data. At SVKs målere er tilpasset ekstreme intensiteter kan stemme godt overens med at disse målere har opfanget mere nedbør end regnmåleren ved EFH for regnhændelser større end 4 mm/døgn.

### 5.1.3 Flow

For at bedømme hvorvidt flowmålerne målte korrekt flow var det ønsket at måle flowet ved udløbet til regnhaven manuelt. Dette var dog ikke muligt da dette udløb befandt sig midt i regnhaven og var dækket med en rist. Desuden lignede det, at alle tre faskiner var koblet til det samme udløb, som befandt sig i midten af regnhaven (se Figur 11). Da flowmålerene målte flowet indirekte ved hastighed og vanddybde,

blev den omtrentlige vandstand i flowbrøndene målt. Vanddybden i brønd nummer 1 (flow ind) var ca. 1 cm, mens den i brønd nummer 2 (flow ud) var ca. 15 cm. Disse tal stemte meget godt overens med de registrerede vanddybder ved flowmålerene den pågældende dag (se eventuelt Figur 28).

Inden de to flowmålere blev monteret blev de testet i en flowbænk ved TIs Rørcenter. Resultaterne af målingerne viste at målerne virkede relativt godt for flows mellem 0,5 og 2 l/s, se Figur 24.



Figur 24, Resultater fra målinger med flowmåler ved Rørcentret. 'Sonde på vinkelbeslag' er samme type flowmåler som er monteret ved faskinen i dag. Graf fra Niels H. Eisum.

Tidligere erfaringer med de samme flowmålere har vist, at de skal have en vandstand på 5 cm over måleren for at hastighedsmålingen skal være pålidelig, ikke 25 cm som producenten oplyser (se afsnit 3.3.4.2). Da der samtidig kan regnes med, at vandet i faskinen har relativt få partikler på grund af rensningen gennem sandfanget. Derfor vil der kræves relativt meget vand for at hastighedsmålingen og dermed flowmålingen vil være korrekt (pers. kom. Eisum, 2010). Forsøgene med flowmålerne ved TI i 2009 viste tydeligt, at alt for høje vandstande heller ikke vil give pålidelige resultater. Dette er på grund af at der ville ske en opstuvning af vand, se fotografier fra forsøget i Figur 25.



Figur 25, Fotografier fra forsøg med Flowmåler. Vandet bliver tilført (øverst i billedet) via et rør til den sorte "spand" der har samme form som bunden af flowbrønden. Vandet kan så løbe ud igen af den samme type rør i den anden ende (nederst i billedet). Billedet til venstre viser 'normale' forhold, hvor flowmåleren vil fungere som den skal. Billedet til højre viser en så stor mængde vand, at det medfører en opstuvning som kan lede til ukorrekte målinger. Foto: Niels H. Eisum

## 5.2 Behandling og udvælgelse af data

Ikke alt målerudstyr var opsat på samme tid. Starten på dataperioden for de online monitorerede data vurderes derfor som tidspunktet da alt udstyret var på plads den 10. december. Der var derfor data fra denne dato frem til og med 10. juli. På grund af den store mængde data, var det nødvendigt at summere data op til dags- og timesværdier for at få et overblik, specielt da det med ujævne mellemrum var flere mindre huller i data. Summeringen indebar en del usikkerheder, eksempelvis ville det ikke opdages om målerudstyret fejlagtigt hang sig op på den samme værdi i perioder, eller hvis der manglede data. Alligevel blev dette foretaget for at få muligheden til at få et overblik over den store mængde data på relativt kort tid.

### 5.2.1 Nedbørsdata

Nedbørsdata blev indsamlet som mm/min og blev summeret op pr dag til at få overblik over data. Til udregning af afstrømningskoefficienten, og til modelleringen af massebalancen blev nedbøren summeret på timesbasis.

### 5.2.2 Flowdata

Flowet blev registreret som en gennemsnitsværdi i l/s hvert femte minut. Når flowdata blev summeret op pr dag blev de derfor multipliceret med 300 ( $=5 \cdot 60s$ ). Til sammenligning med massebalancemodellen og til beregning af afstrømningskoefficienten blev flowdata summeret op over timer og multipliceret med 300.

### 5.2.3 Vandniveaudata

Vandniveau blev registreret hvert femte minut. Data blev summeret op til hele døgn for at få et overblik. For beregning af hydraulisk ledningsevne og for sammenligning med massebalancemodellen blev data summeret op over timer, og der blev beregnet et gennemsnit. Dette var for at få vandstanden til at passe med den virkelige vandstand, da vandstanden var essentiel i modellen, for at kunne simulere, hvornår et overløb skete. Til vandspejlsændringsmodellen blev gennemsnitsværdien pr time benyttet, mens der til den hydrauliske gradient blev udvalgt justerede monitorerede værdier til enkelte tidspunkter.

### 5.2.4 Manglende data

Tabel 3 viser et overblik over, hvilke af de online monitorerede data, der i store perioder mangler. Flere mindre perioder forekommer også, som f.eks. nogle minutter, eller fem minutter hver dag ved midnat. Disse huller er dog, på grund af deres begrænsede omfang og af tidsmæssige grunde, ikke nærmere kortlagt.

Tabel 3 Overblik over større perioder med manglende data. Hvis muligt er årsagen angivet.

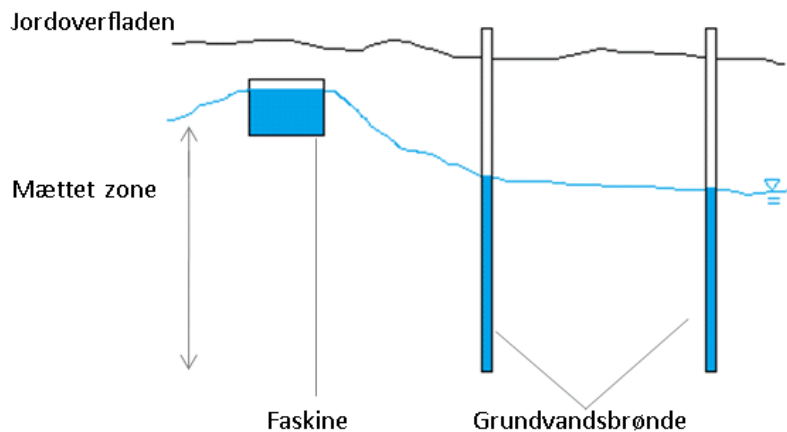
Måler	Fra og med	Til og med	Årsag
Flow ind	11-feb-2010 06:05	13-feb-2010 18:26	Ukendt. Sandsynligvis at data er blevet slettet da modem ikke kunne hente dem en periode.
Flow ud	12-feb-2010 00:00	21-feb-2010 00:00	Ukendt. Sandsynligvis at data er blevet slettet da modem ikke kunne hente dem en periode.
Flow ud	13-feb-2010 04:33	20-feb-2010 03:15	Ukendt. Sandsynligvis at data er blevet slettet da modem ikke kunne hente dem en periode.
Flow ind	15-feb-2010 20:00	23-feb-2010 17:43	Ukendt. Sandsynligvis at data er blevet slettet da modem ikke kunne hente dem en periode.
Nedbør	05-mar-2010 11:42	23-mar-2010 13:40	Modul der logger nedbør og flow fjernet for at repareres
Vandniveauer	6-maj-2010 03:10	21-maj-2010 14:51	Sandsynligvis løs forbindelse i stikket til datalogger
Vandniveauer	30-maj 02:30	1-juni-2010 18:20	Batteri til modem gået tom for strøm og modem gik tilbage til fabriksindstillingene, dvs. modemmet besvarede ikke opkald. På grund af begrænset hukommelseskapacitet er derfor nogle data gået tabt.

## 5.3 Overblik over online monitorerede data

### 5.3.1 Vandniveauer

De online monitorerede vandniveauer, justeret til absolutte koter på baggrund af pejlingerne, benævnes herefter for nemheds skyld kun 'monitorerede vandniveauer'. Gennem hele perioden viste disse data et relativt højt vandniveau i faskinen (se Figur 20). Vandspejlet ligger som minimum på ca. kote 550, det vil sige faskinen er 75 % fyldt. Grundvandstanden varierer i den observerede periode fra 1,5 til 2,30 meter under terræn målt ved fordelerbrønden (se Figur 20). Tidligere undersøgelser havde vist en grundvandspejlsvariation på 0,5 til 2,5 m.u.t. (se afsnit 3.3.1), de monitorerede værdier passer meget godt overens med dette. Gennem hele perioden står det sekundære grundvandsspejl meget tæt på faskinens bund. Når grundvandstanden er på sit laveste i januar/februar er grundvandsspejlet ved G0.5 ca. 20 cm under faskinebunden. På det højeste er grundvandsspejlet ved G0.5 ca. 10 cm over faskinebundens kote (se Figur 20). Dette betyder, da vandet spreder sig fra faskinen i en slags mættet "pære" (se eventuelt Figur 7), at der meget sandsynligt er direkte kontakt mellem grundvandsspejlet og den mættede zone omkring faskinen, se illustration på Figur 26.





Figur 26, Illustration der viser den mest sandsynlige sammenhæng mellem faskine og grundvand.

Selvom der er registreret et vandspejl der er 20cm lavere end faskinebunden er dette ca. 0,5 meter væk fra faskinen, og da der er en mættet zone omkring faskinen er det meget sandsynligt, at det ser ud som på tegningen. Antagelsen om mættet strømning ud af faskinen virker derfor til at være meget passende.

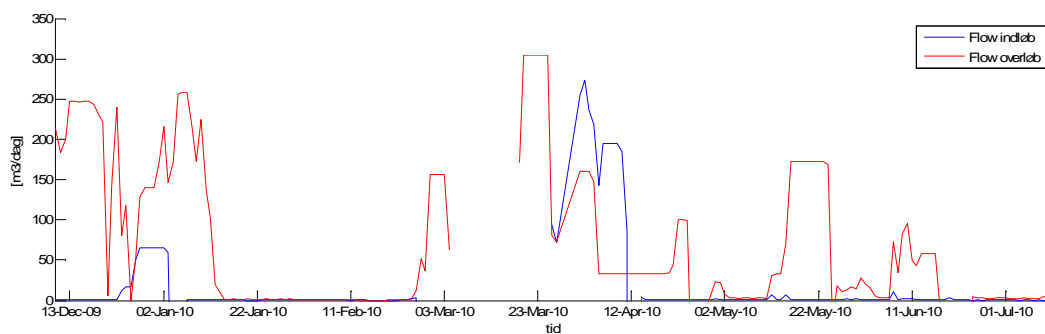
Da afstanden fra faskinens bund op til jordoverfladen blev målt, blev dette foretaget med et målebånd. Da det ikke vides hvor tyk den ydre plastikkant omkring faskinen er, kunne denne ikke lægges til. Den er måske omkring en centimeter eller mindre og dermed kan faskinens beliggenhed derfor være fejlvurderet med op til ca. en centimeter. De andre usikkerheder taget i betragtning, som unøjagtigheder i selve målebåndet og i pejlingerne, anses ikke for at være afgørende.

Vandniveauet forventes at falde henover sommeren, både for grundvandet og i faskinen, jævnfør sæsonvariationene beskrevet i afsnit 3.1. Dette ses også tydeligt for faskinen og G0.5, men ikke for G2.0 (Figur 20). For faskinen og G0.5 ses en tydelig forskel fra marts til maj i vandspejlet, men en mindre stigning fra maj til juni. Årsagen til stigningen kan være at vandniveaudata fra slutningen af maj nok ikke er helt pålidelige. Alle vandstande faldt på dette tidspunkt usandsynligt meget, samtidig med at der var problemer med at få logget disse data (se afsnit 3.3.4.5). Vandspejlet for både faskine og grundvand ligger under alle omstændigheder i gennemsnit lavere i juni end i marts. G2.0 har af ukendte grunde en stigning i grundvandstanden i midten af april, hvilket muligvis skyldes lokale variationer i grundvandsspejlet.

### 5.3.2 Flowmålere

Flowmålerne har i flere perioder målt ingen eller usandsynligt store værdier. Det målte flow både ved indløb og overløbet til faskinen kan ses på Figur 27.

En regnhændelse på 10mm på en dag ville medføre, at der blev tilført  $3,6 \text{ m}^3$  vand til faskinen, ved et oplandsareal på  $400 \text{ m}^2$  og en afstrømningskoefficient skønnet til 0,9. Nogle flows, der er registreret i perioden er på  $300 \text{ m}^3$  pr dag, hvilket kun ville have sket, om det regnede 833 mm på en dag! Dette er mere end den gennemsnitlige årsnedbør for København og Nordsjælland som ligger på 613 mm (Dmi, 2010). Alle værdier over  $15 \text{ m}^3$  pr dag virker meget usandsynlige, da  $15 \text{ m}^3$  her svarer til lidt over 41 mm nedbør.



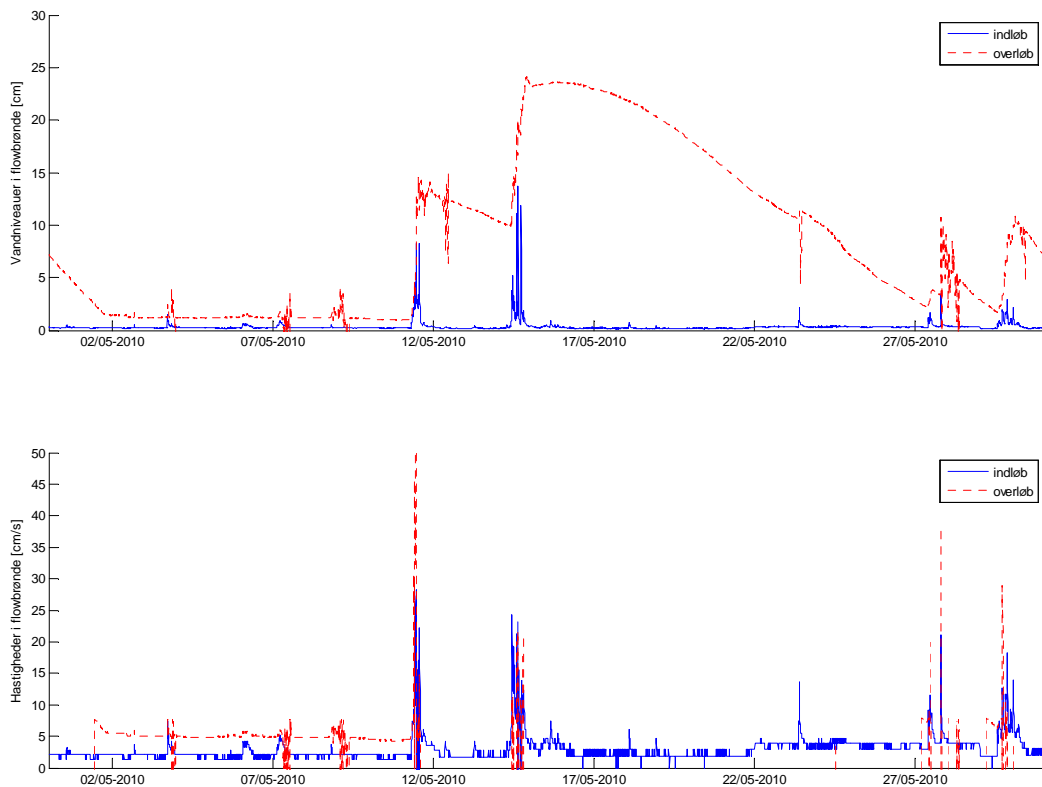
Figur 27, Data fra flowmålerne ved EFH fra og med 10. december til og med 10. juni. Sum af dagsværdier.

Flowmåleren ved indløbet virker nogenlunde pålidelig fra og med 19. april og frem til periodens slutning. Dette vurderes nærmere på baggrund af nedbørsdata senere (se afsnit 5.4). I hele forløbet var der problemer med flowmåleren ved overløbet.

Der er konstant registreret et større flow ved overløbet end ved indløbet til faskinen. Dette gjorde, at der var en mistanke om, at data fra flowmålerne var blevet ombyttet. Denne hypotese kunne dog forkastes på grundlag af to ting. For det første var flowmåleren ved indløbet installeret næsten en halv måned inden den ved overløbet, og da data viser konstante værdier for den første flowmåler (se Figur 27) virker det meget usandsynligt, at de har været ombyttet ved installationen af den anden. For det andet passede de målte vanddybder i brøndene med det flowmålerne målte, se afsnit 5.1.3.

En anden grund til, at der er registreret et så stort flow ved overløbet er, at der kommer vand ind i faskinen fra andre steder end fra indløbet. Grundvand kunne være en mulighed, specielt da grundvandstanden er så høj, men det virker ikke så sandsynligt, da grundvandet bevæger sig langsomt og da ændringerne i flowet ved overløbet sker meget skarpt. En anden mulighed kunne være, at der kom vand ind fra et andet sted, som eksempelvis regnhaven eller fra overfladen over faskinen. Regnhaven er ca. 10 meter væk fra enden af faskinen og på kote 31,6-31,9 m. Faskinen ligger på kote 31,6-32,2 m. Det virker derfor ikke særligt sandsynligt, med hensyn til den høje vandstand i faskinen, at der er kommet vand fra regnhaven til faskinen. På grund af at jorden er leret har den en lav hydraulisk ledningsevne og det ville tage meget lang tid for regnvand at komme direkte ind i faskinen fra oven. Der virker derfor til, at der hovedsagligt er en fejl i flowmåleren selv, der forårsager de meget store registrerede flows.

Da flowmåleren hverken skal have for høje eller for lave vanddybder for at måle en hastighed, kan det være at dette har forstyrrer målingerne. Da det ser ud til flowmåleren fungerer selv ved lave vanddybder (under de 2,5 cm som er opgivet fra leverandøren, se afsnit 3.3.4.2), blev der ikke sat en nedre grænse for vanddybde i flowbrønden for at godkende data. For større vanddybder blev data omtrent automatisk forkastet, da flowmålerne var således indstillet, at hvis de ikke kunne registrere en vandhastighed benyttedes den sidst registrerede hastighed. På Figur 28 kan et plot over vandstandene for maj ses som eksempel. Des ses, at når vandstandene for flowmåleren ved overløbet bliver for store, bliver ingen hastighed registreret. Der bliver registreret en hastighed lige når vandstanden stiger, sandsynligvis da der er meget ekstra bevægelse i vandet her. Ellers bliver ingen ny hastighed registreret og på grund af den dybe vandstand ved opstuvning vil flowmåleren vise et meget stort flow ud, når der i virkeligheden er intet eller et meget lille flow ud.



Figur 28, Plot af vandniveauer (øverst) og hastigheder (nederst) i flowbrødene i maj. Rådata er logget som et gennemsnit for hvert femte minut.

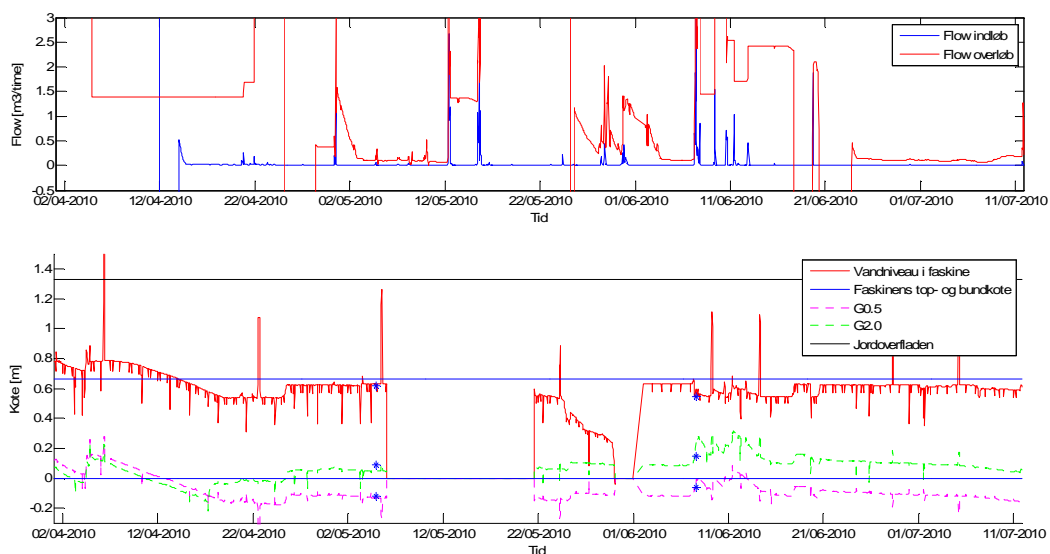
### 5.3.3 Udvalgelse af data

Da der den pågældende vinter faldt unormalt store mængder nedbør som sne, kan data til og med marts ikke benyttes til massebalancen, da denne ikke tager højde for snesmelting. Da flowdata frem til 19. april stort set ikke kunne benyttes, blev det derfor vurderet som rimeligt kun at undersøge de monitorerede data fra og med 1. april til og med 10. juli nærmere.

### 5.3.4 Overblik over udvalgte periode

Figur 29 viser de monitorerede flows og vandniveau i faskinen i perioden 1. april til og med 10. juli. De pejlede vandniveauer er også taget med til sammenligning.





Figur 29, Plot af det registrerede flow og vandniveau i perioden 1. april til og med 10. juli. Jordoverfladen ved fordelbrønden er også indtegnet. Summerede timesværdier for flow, gennemsnitlig timesværdi for vandspejlet. Pejlingerne er markeret med blå stjerner.

Der observeres gennem hele perioden en masse 'spidser', eller skrappe svingninger i data. Da disse antageligvis skyldes svingninger i måleren og eventuelt et manglende datapunkt i den pågældende time, bliver der set væk fra disse 'spidser'.

Data i perioden har som tidligere beskrevet problemer med flowmåleren ved overløbet. Flowmåleren ved indløbet ser ud til at fungere efter 19. april. Vandstanden i faskinen er nogenlunde konstant, men overordnet falder vandspejlet. Fra starten er vandspejlet i faskinen højere end topkoten til faskinen. Hvad grunden til at der er registreret en så høj vandstand vides ikke, da dette burde være fysisk umuligt. En mulighed er, at der er en fejl i de monitorerede data. En anden mulighed er, at der sker en opstuvning af vand i fordelbrønden, da faskinen ikke på andre måder kan skaffe sig af med vandet hurtig nok.

En anden periode, der er værd at mærke sig, er vandniveaudata for slutningen af maj. Data fra ca. 25. maj og frem til 1. juli virker ikke særlig pålidelige. Der er et usandsynligt stort fald i vandniveaudata, der ikke er observeret andre steder og som sker samtidig med, at der er registreret et flow ind i faskinen. Bagefter stiger vandstanden meget pludseligt igen efter en periode med manglende data, selvom der ikke er registreret noget flow ind på dette tidspunkt. I netop denne periode var der problemer med at hente vandniveaudata, og nogen data er derfor gået tabt i denne periode (se afsnit 3.3.4.5). Dette fald i vandniveaudata bliver derfor ikke set nærmere på i denne opgave, da det antages at de faldende værdier for vandspejlet skyldes et teknisk problem.

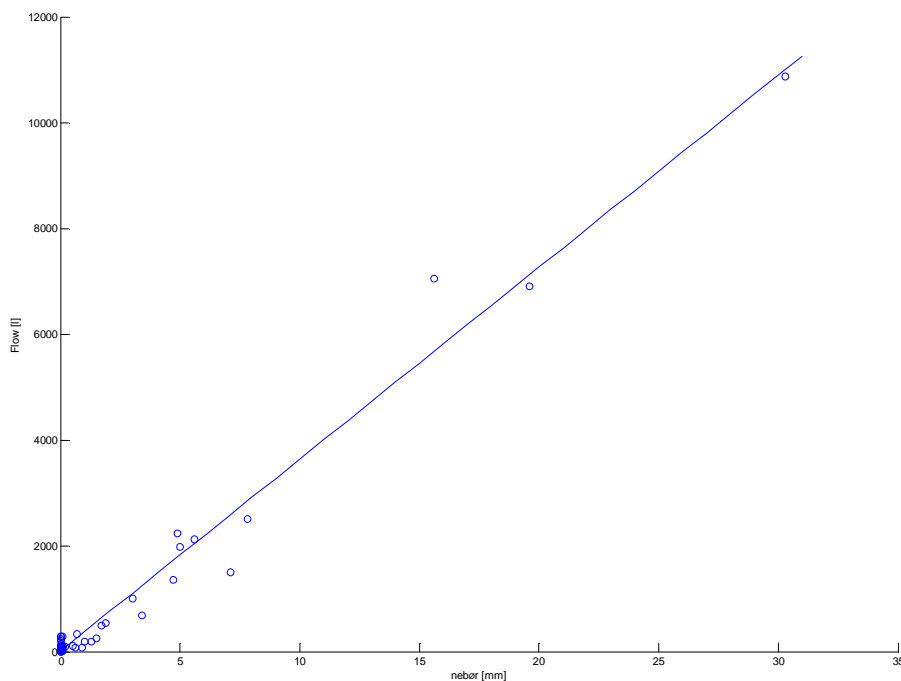
I en periode var der tvivl om faskinens dimensioner, og da det er faskinens højde, der angiver, hvornår der sker et overløb i modellen, var det meget vigtigt at få disse fastlagt. Problemet var at tegninger fra entreprenøren og informationer fra teknologisk institut ikke stemte overens og ingen af disse dimensioner stemte rigtigt overens med data. Efter en del undersøgelser blev der konstateret i samarbejde med TI de dimensioner som kan ses på Figur 13, for detaljer omkring bestemmelse af faskinens dimensioner se appendiks vi.

Det virker totalt set til, at der er en del usikkerheder omkring de monitorerede data, og at disse resultater skal tages med forbehold. Dette gælder hovedsageligt med flowmålerne, men også med målerne af vandspejlet.

## 5.4 Afstrømningskoefficient

For at beregne afstrømningskoefficienten blev alle data fra den udvalgte periode, udtagen april, benyttet. Dette var eftersom flowdata helt frem til slutningen af april ikke virkede pålidelige og det ikke ønskedes at disse skulle påvirke resultatet. Af tekniske årsager var det mest praktisk at vælge starten af en måned som starten på data og 1. maj blev derfor valgt.

Alle dages mm nedbør blev plottet mod det totale flow ind i faskinen i liter pr dag, og den lineære regressionslinje til punkterne blev fundet. Regressionen har en  $R^2$  værdi på 0,98, det vil sige at der generelt ses en meget god sammenhæng mellem data. Hældningen på regressionslinje er 362,8 og skæringen med y-aksen er 0,42. Hældningen på regressionslinien er det samme som CA., jævnfør formel 2.). Da  $A=400\text{m}^2$  giver dette  $C=0,91$ , som passer meget godt for tage, da afstrømningskoefficienten normalt ligger mellem 0,85 og 0,95 (se afsnit 3.1.2). Skæringspunktet med y-aksen angiver initialtabet til oplandsarealet, da dette er et tag er det, som forventet, kun et meget lille initialtab.



Figur 30, Plot af nedbør imod det monitorerede flow ved indløbet til faskinen, samt lineær regressionslinje.  $R^2=0,98$ .

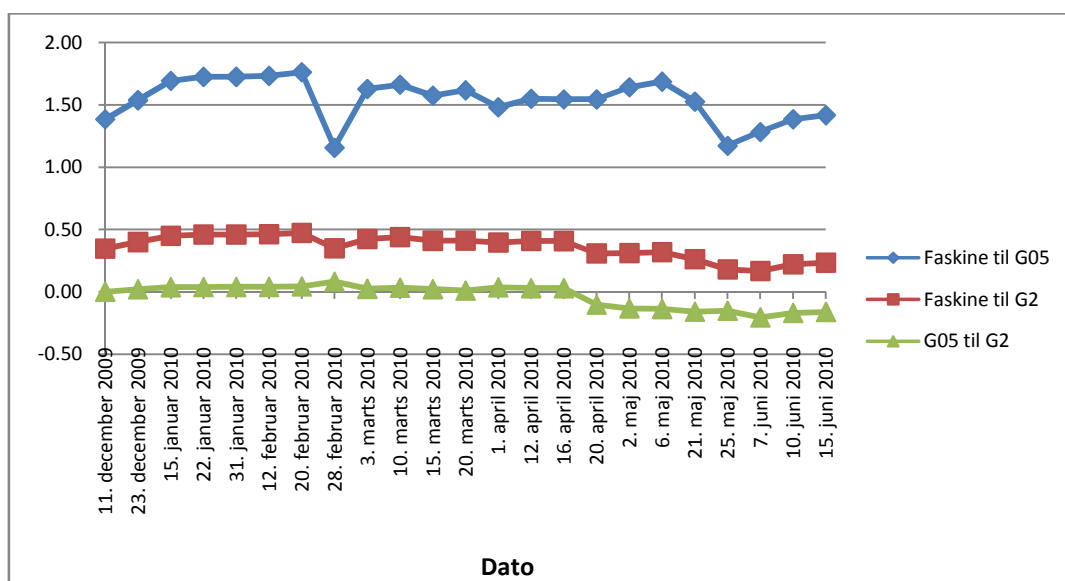
Den gode sammenhæng mellem data, taget i betragtning at nedbørsdata fra regnmåleren virker meget pålidelige, giver grund til at tro at data fra flowmåleren ved indløbet også er pålidelige i den udvalgte periode.

## 5.5 Hydrauliske gradienter

På baggrund af de monitorerede vandniveauer blev der beregnet hydrauliske gradienter fra faskinen til G0.5, fra faskinen G2.0 og for G0.5 til G2.0. Et plot i udviklingen af hydrauliske gradienter over tid kan ses i

Figur 31. Datoerne er udvalgt med jævne mellemrum, i næsten alle tilfælde kl 12:00, hvis dette var muligt. Et gennemsnit af dagsværdier blev ikke benyttet på grund af de store mængder manglede data. Selvom dette skaber nogle usikkerheder, blev det skønnet, at usikkerheden i at komme til at udvælge et gennemsnit, der var baseret på en periode med manglede data, var større. Alle data blev også udvalgt ved at kigge på sammenhængen i data, for at se at værdien ikke var et mindre tilfældigt udfald.

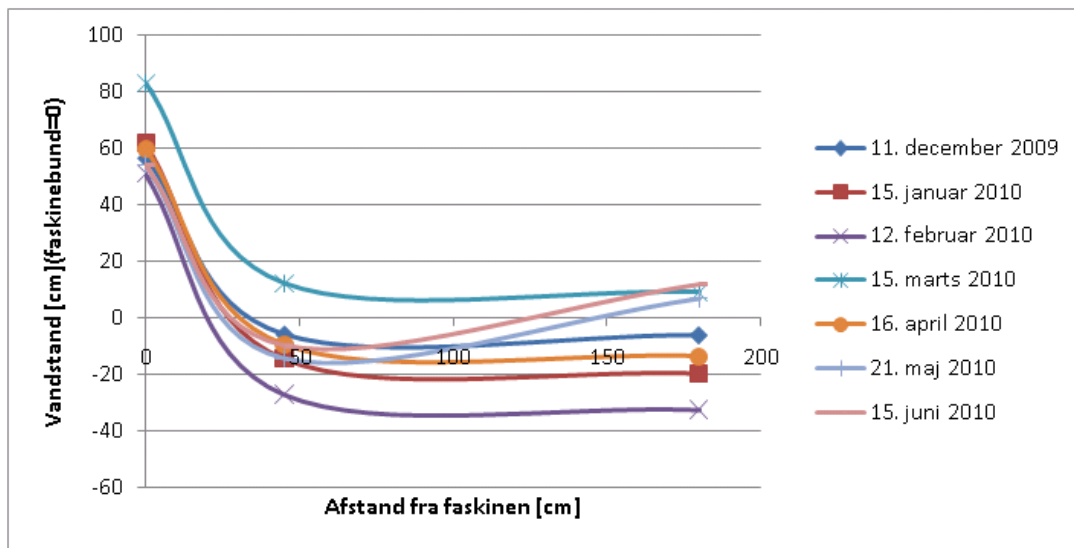
Det ses af Figur 31 at der konstant er en hydraulisk gradient ud af faskinen (blå og røde markeringer). I midten af april stiger grundvandstanden 2 meter væk fra faskinen, mens de to andre vandstande holder sig konstante eller synker, se eventuelt Figur 20. Dette medfører, at der bliver en negativ hydraulisk gradient fra G2 til G05, altså at der strømmer vand fra G2 til G05. Det er dog stadig en hydraulisk gradient ud af faskinen. Den hydrauliske gradient er i gennemsnit 1,5 fra faskine til G0.5 og 0,3 fra faskine i G2.0.



Figur 31, Hydrauliske gradienter mellem faskine, G0.5 og G2.0, i perioden 11. december til 15. juni.

For beregninger af den hydrauliske gradient, se bilag vii. Som beskrevet i afsnit 3.2.1 vil en grundvandstand over faskinens bund forhindre perkolation af vand ud af siderne på faskinen. Selv om der er en hydraulisk gradient ud af faskinen, vil nedsivningen dermed blive begrænset. At der er tegn på, at der strømmer vand fra G2.0 til G0.5, er uventet. Vandspejlsstigningen ved G2.0 kan måske skyldes en form for lokal variation i grundvandsspejlet. Samtidig er det vigtigt at huske, at den hydrauliske gradient kun er et todimensionelt billede på, hvordan grundvandet bevæger sig, og at den tredje og sidste dimension derfor mangler.

Tidligere målinger har vist, at grundvandsspejlet kunne være så højt som kun 0,5 m.u.t (se afsnit 3.3.1). Dette ville have medført en hydraulisk gradient ind i faskinen, da faskinens top er ca. 1,4 m.u.t. For at få et billede af, hvordan vandspejlet så ud fra faskinens kant til G2.0 blev vandniveauerne plottet som funktion af deres afstand fra faskinen til de tidspunkter den hydrauliske gradient var udregnet for, resultatet kan ses i Figur 32. Det ses, at vandspejlet er højest i marts og i gennemsnit lavere om sommeren, hvis der ses væk fra snesmeltning og stigningen i vandstanden ved G2.0. Figuren styrker formodningen om at grundvandet og den mættede zone omkring faskinen hænger sammen (se evt Figur 26)



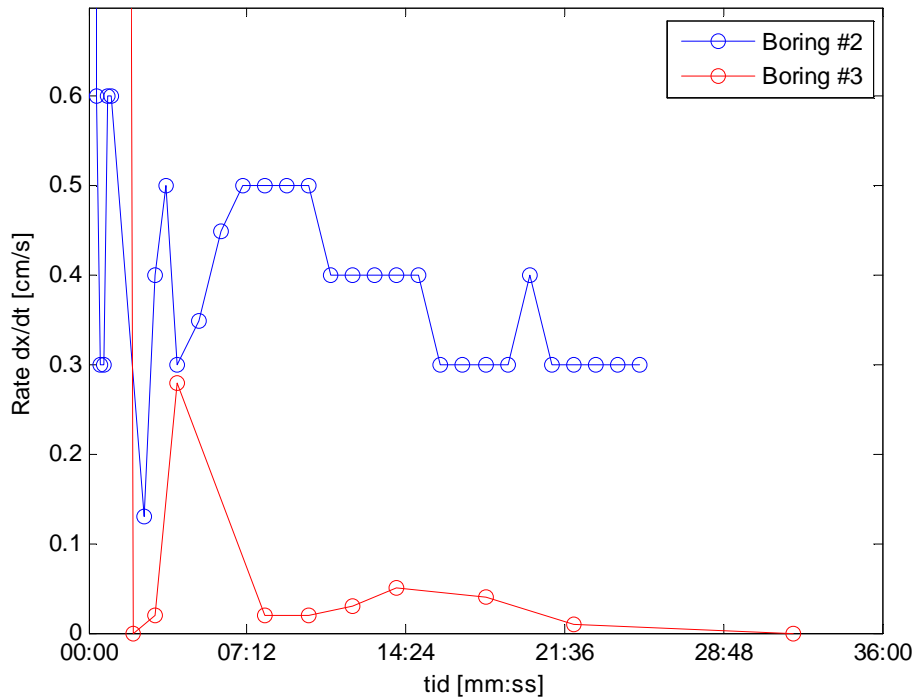
Figur 32, Graf, der viser vandstanden i faskine og grundvand, som funktion af afstand fra faskinen. Resultatet for hver måned i løbet af perioden er optegnet.

## 5.6 Hydraulisk ledningsevne

Den mættede hydrauliske ledningsevne,  $K_s$ , kan estimeres på flere forskellige måder. I dette projekt blev  $K_s$  estimeret fra målinger med et permeameter, ved en sænkingsmodel og ved kalibrering af massebalancemodellen. Inden projektets start var jorden ved faskinen vurderet, fra en boring, til sandet ler, med en  $K=10^{-6}$  m/s (se afsnit 3.3.1), nogen videre vurdering direkte ud fra jordprøver blev ikke foretaget i forbindelse med dette projekt.

### 5.6.1 Permeameter

Der blev foretaget tre boringer til at foretage målinger med permeameteret i. Ved den første boring var permeameterets luftrør ikke helt nederst i bunden, hvilket der også havde været problemer med i testfasen af permeameteret. Når luftrøret ikke var helt nede kunne der komme luft ind i reservoiret når vandet blev påfyldt. Dermed randt alt vandet umiddelbart ud i brønden. Brønden blev helt fyldt med vand og kunne derfor ikke benyttes til at måle på. Den anden brønd blev der foretaget en vellykket måling på, efter 25 minutter var en konstant faldrate på 0,3 cm/min opnået, se Figur 33.



Figur 33, Faldrater for vandstanden i cm/s som funktion af tiden. Fra boring #2 kan det ses at faldraten stabiliserer sig på 0.3 cm/s, for boring #3 bliver raten ved med at falde indtil den var 0 mm på et interval på 10 minutter.

Den tredje boring havde i gennemsnit en meget mindre faldrate. Faldraten var nogenlunde konstant et stykke tid, men steg lidt inden den faldt endnu lavere og til sidst var faldraten 0 mm på 10 minutter, se Figur 33. Dette var efter 36 minutter og af tidsmæssige årsager blev forsøget afsluttet og der blev ikke foretaget nogen ny boring. Boring nummer to anses for mest pålidelige, da der kun i dette tilfældet helt sikkert blev observeret en konstant faldrate. Derfor er det kun resultatet fra brønd nummer to, der vil blive benyttet videre i denne opgave.

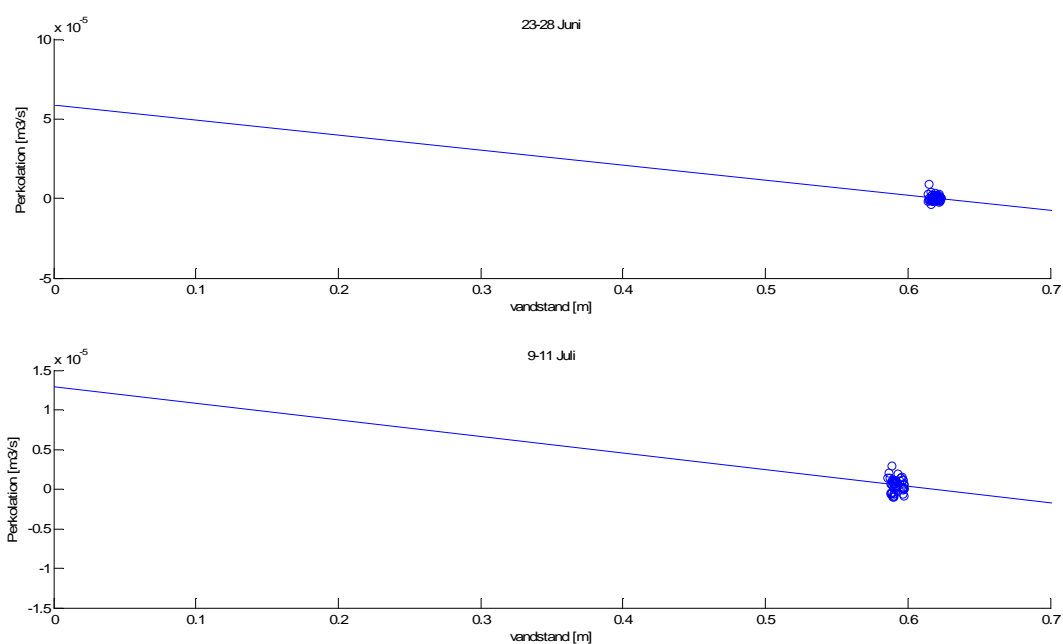
Med resultatet fra boring nummer to, og formel 9.) i afsnit 3.1.3.4 kunne  $K_{fs}$  beregnes. Rådata kan ses i bilag v.  $\alpha^*$  blev estimeret til 0,04, da det observeredes, at jorden var leret og da lerede jordbundsforhold også havde været konklusionen af den tidligere boring. Dette gav en  $K_{fs}$  på  $9,4 \cdot 10^{-8}$  m/s. Da usikkerheden på målingen ved at benytte et enkelt vandniveau var oplyst til en faktor 3 (se afsnit 4.1.1) betyder dette, at  $K_{fs}$  mest sandsynligt ligger i intervallet  $2,8 \cdot 10^{-7}$  og  $3,1 \cdot 10^{-8}$  m/s. Der er større usikkerheder omkring denne værdi på grund af jordens heterogenitet og eventuel lagdeling i jorden. Desuden er  $K_{fs}$  noget lavere end  $K_s$  (se afsnit 3.1.3.4). Størrelsen af disse usikkerheder var dog ikke mulig at skønne, derfor blev der, til sammenligning, forsøgt også at estimere den hydrauliske ledningsevne ved andre metoder.

### 5.6.2 Sænkingsmodel

Ud fra metoden beskrevet i afsnit 4.2.2 blev sænkingsforløbet i faskinen analyseret for at finde  $K_s$ . Da vandstanden i faskinen hele tiden var relativ høj kan der antages, at det meste af perkolationen sker i jord der er konstant mættet, og det vil derfor være  $K_s$  der bliver fundet ved denne metode, ikke  $K_{fs}$ .

Først blev perioder i de monitorerede, justerede data identificeret, hvor der kunne antages, at det kun var nedsivningen, der påvirkede vandstanden, altså perioder uden hverken flow ved indløbet eller ved

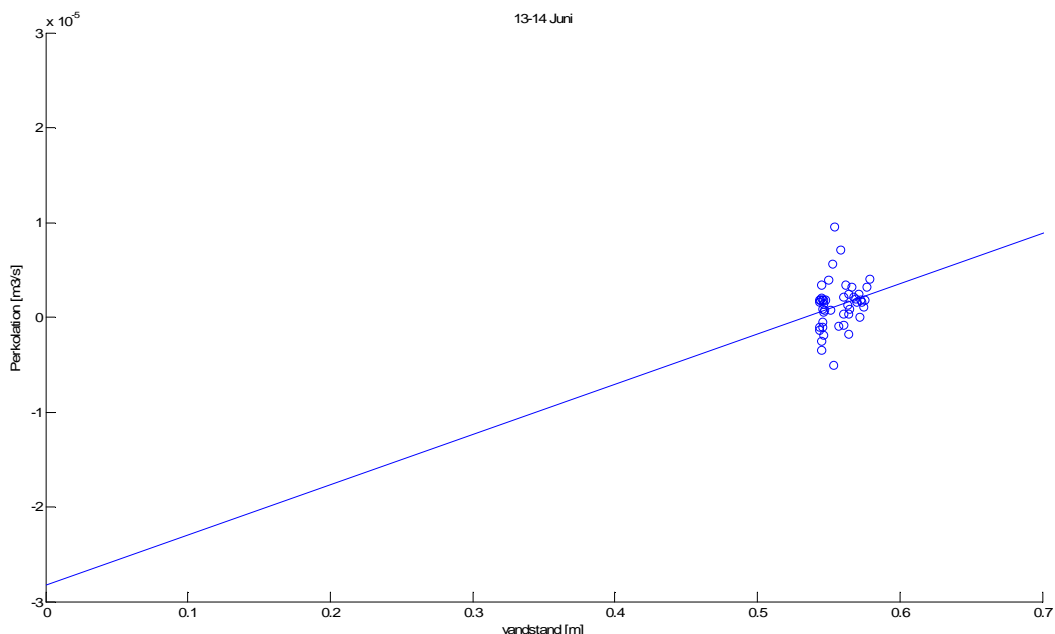
overløbet. Problemet var, at vandspejlet faldt langsomt, ca. med 1-2 cm på 6 dage, eller overhovedet ikke faldt (se eventuelt Figur 29) Dette gjorde, at vandspejlsforskellen var for lille til at analysere sænkingsforløbet. Selvom det var små ændringer i vandspejlet endte regressionsfunktionen, der skulle beskrive den hydrauliske ledningsevne, at være faldende for stigende vandvolumen (se Figur 34 for eksempler). Da det er klart, at en højere vandstand vil medføre større infiltration da infiltrationsarealet er større, blev alle resultater, hvor regressionsfunktioner viste en negativ hældning forkastet.



Figur 34, Plot af punkter med regressionslinje for sænkingsmodel for 23-28. juni og 9-11. juli. Læg mærke til at akserne er forskellige for at vise skæringspunktet med y-aksen. Hældningen på den øverste figur er dermed meget større end på den nederste. Øverste figur har  $\alpha=-9,4*10^{-3}$  og  $\beta=5,8*10^{-3}$ ,  $R^2=0,0239$ . Nederste figur har  $\alpha=-2,1*10^{-3}$  og  $\beta=1,3*10^{-3}$ ,  $R^2=0,007$

Grunden til at regressionsfunktionen kan have været faldende i så mange tilfælde skyldes sandsynligvis små svingninger forårsaget af trykstransduceren selv. Der kan også være en mulighed for, at der er kommet grundvand ind i faskinen. Grundvandsspejlet står meget højt ved Teknologisk Institut (se afsnit 5.1.1), så selvom der er en hydraulisk gradient ud af faskinen, er dette kun i forhold til grundvandstanden i to enkeltpunkter, i den ene ende, på den ene side af faskinen. Det kan godt være muligt at grundvand kommer ind i faskinen fra den anden side eller den anden ende, specielt da faskinen er hele 8 meter lang og grundvandsvariationerne kan have store variationer over korte afstande. At der tidligere er observeret grundvandstand op til 0,5 m.u.t og at vandspejlet ved G.2.0 stiger fra midten af april kan være tegn på lokale variationer. Resultaterne fra G0.5 og G2.0 antyder, at der er direkte kontakt mellem grundvand og den mættede zone omkring faskinen (se afsnit 5.3.1). Små variationer i grundvandsstrømningerne kan have forårsaget at vandvolumen både blev ført ind, men måske også ud af faskinen. Det er med de nuværende informationer umuligt at skønne størrelsen af eventuelle direkte interaktioner mellem grundvand og faskine, og vurdere om disse burde være med i modellen af faskinen. En måling af grundvandet flere steder i området, for eksempel langs hele faskinens længde og på den andre side af faskinen, kunne måske give et bedre billede af de lokale variationer i grundvandsspejlet.

Den eneste dataperiode der blev fundet, hvor der ikke var registreret nogen flow ved indløbet eller overløbet til faskinen, og hvor regressionsfunktionen til data samtidig var stigende, var perioden 13-14. juni. Denne periode havde et vandspejl der var, som forventet, tilnærmelsesvis eksponentielt aftagende. Regressionslinjen havde en hældning på  $5,3 \cdot 10^{-5}$  og et skæringspunkt med y-aksen på  $-2,8 \cdot 10^{-5}$ , se Figur 35.



Figur 35, h (vandstand) plote mod Qper (infiltration), samt regressionslinjen.  $\alpha=5,3 \cdot 10^{-5}$   $\beta=-2,8 \cdot 10^{-5}$ .  $R^2=0,058$

Den hydrauliske ledningsevne blev beregnet jævnfør formel 22.) til  $3,0 \cdot 10^{-6}$  for siderne. Da regressionslinjen skar y-aksen under nul blev perkolationen fra bunden af faskinen beregnet til, jævnfør formel 21.), til at være *negativ* ( $-4,4 \cdot 10^{-6}$ ). Dette ville betyde, at der kommer vand ind i faskinen fra bunden.

Der er dog en ret stor usikkerhed omkring værdien for skæringspunktet med y-aksen, da dette punkt er meget langt fra datapunkterne. Hældningens værdi, derimod, har en meget mindre usikkerhed, da denne er bestemt af flere punkter, der ligger relativt tæt. Da  $R^2$  værdien er relativt lav er der dog usikkerheder forbundet med begge værdier. Med hensyn til disse usikkerheder og det faktum, at det ikke vides med sikkerhed, om der er kommet grundvand ind i faskinen, mens der er registreret en konstant hydraulisk gradient ud af faskinen, er det svært at afgøre, hvorvidt dette resultat giver et godt billede af  $K_s$  ved faskinen. Resultatet styrker dog hypotesen om, at der ved dele af faskinen eller i nogle perioder, som for eksempel den 13-14. juni, står grundvandet så højt at en interaktion mellem faskinen og grundvandet er muligt.

### 5.6.3 Kalibrering

For at estimere den hydrauliske ledningsevne efter de monitorerede data, blev forskellige gæt for  $K_s$  sat ind i modellen og den simulerede vandstand blev sammenlignet med den monitorerede.

$K_{fs}$  fra permeameteret blev indsat i modellen, som ledningsevne for både bund og sider. Der observeredes en god sammenhæng mellem data og modellen, men  $K_s$  var en anelse for lille. Der blev derfor forsøgt med forskellige værdier af  $K_s$ . Den ledningsevne der passede bedst ind i modellen var  $3 \cdot 10^{-8}$ . Denne værdi er en



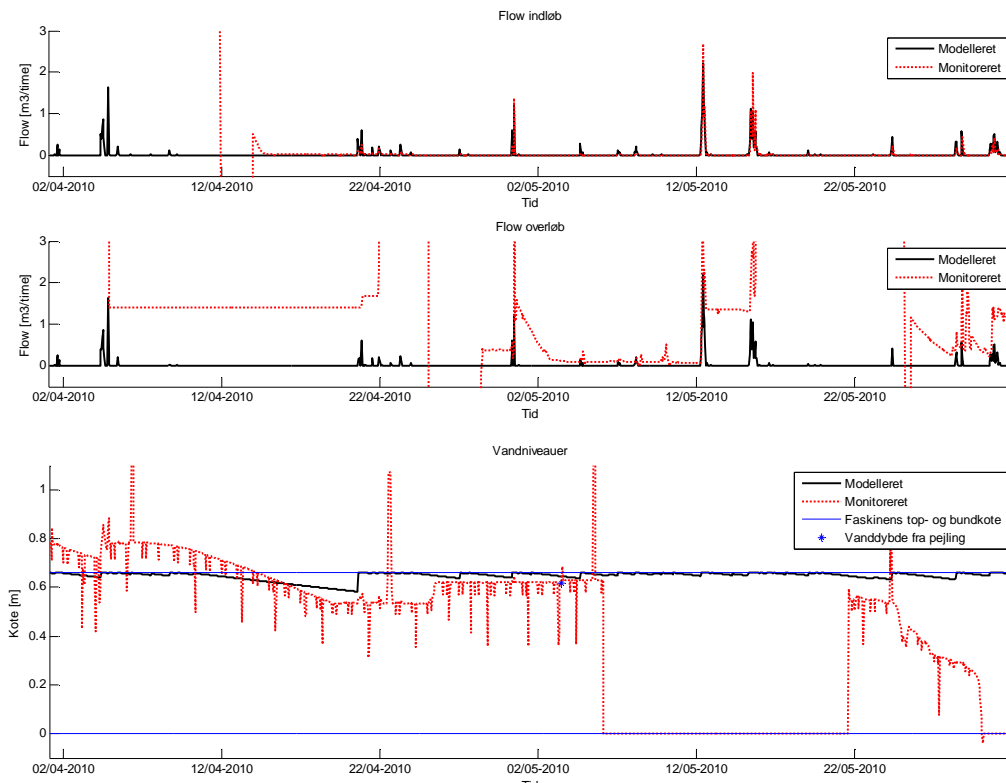
faktor 3 større end den målte  $K_{fs}$ , noget der passer godt med usikkerheden ved at benytte en enkelt vandstand ved målingen med permeameteret (se afsnit 4.1.1). Denne værdi af  $K_s$  blev benyttet videre i modelleringen, og vil fra nu af benævnes  $K_{s1}$ . Det anses som rimeligt, at antage samme ledningsevne gennem bund og sider, selvom dette er en forenkling. Nedsivning gennem bunden vil efterhånden begrænses af tilstopning, men da faskinen er relativt ny antages der, at tilstopningen ikke er af afgørende betydning. Ved en mættet strømning vil der være færre luftbobler i jorden end ved  $K_{fs}$ , og  $K_s$  vil derfor være en noget større end den målte. Dette passer meget godt med, at den kalibrerede værdi er lavere end den målte  $K_{fs}$ .  $K_{s1}$  er ret lav, i forhold til hvad forskellige standarder anbefaler at denne værdi omkring en faskine skal være (se afsnit 3.2.1). Københavns kommune angiver, at  $K$  ikke bør være mindre end  $10^{-7}$ , men andre har en højere grænse. Den laveste grænse der blev fundet beskrevet i litteraturstudiet var fra TI på  $10^{-8}$ .  $K_{s1}$  på  $3 \cdot 10^{-8}$  vil derfor nok give en begrænset nedsivning af regnvand fra faskinen. Faskinen blev dimensioneret til en  $K_s$  på  $10^{-6}$ , selvom der var store usikkerheder omkring denne værdi. En forskel på to størrelsesordner i  $K_s$  vil medføre, jævnfør dimensioneringspraksisen beskrevet i afsnit 3.2.2, at KAR bliver 100 gange mindre og dermed bliver  $V_r$  10 gange så stor. Dette ville medføre en 10 gange så stor faskine! Desuden ville resultatet af en KAR på den størrelse ( $10^8$ ) ikke være med i dimensioneringsskemaet, da dette kun går til  $10^6$ .

Da  $K_{s1}$  var så uventet lav og hele to størrelsesordner mindre end skønnet fra boringer blev også den fundne ledningsevne fra vandspejlssænkningen,  $K_{bund} = -4,4 \cdot 10^{-6}$  og  $K_{side} = 3,0 \cdot 10^{-6}$  herefter benævnt  $K_{s2}$ , indsat direkte i massebalancemodellen for at undersøge, hvordan dette resultat hang sammen med de målte værdier. Da denne  $K_s$  passede til modellen i lige så stor grad som  $K_{s1}$  blev det besluttet at gå videre med begge  $K_s$  i modelleringen. Der er usikkerheder tilknyttet begge værdier, den ene,  $K_{s1}$ , virker meget lav, mens  $K_{s2}$  forudsætter, at der kommer vand ind gennem bunden af faskinen. Desuden er der store usikkerheder tilknyttet metoderne, hvormed de to værdier for  $K_s$  blev fundet.

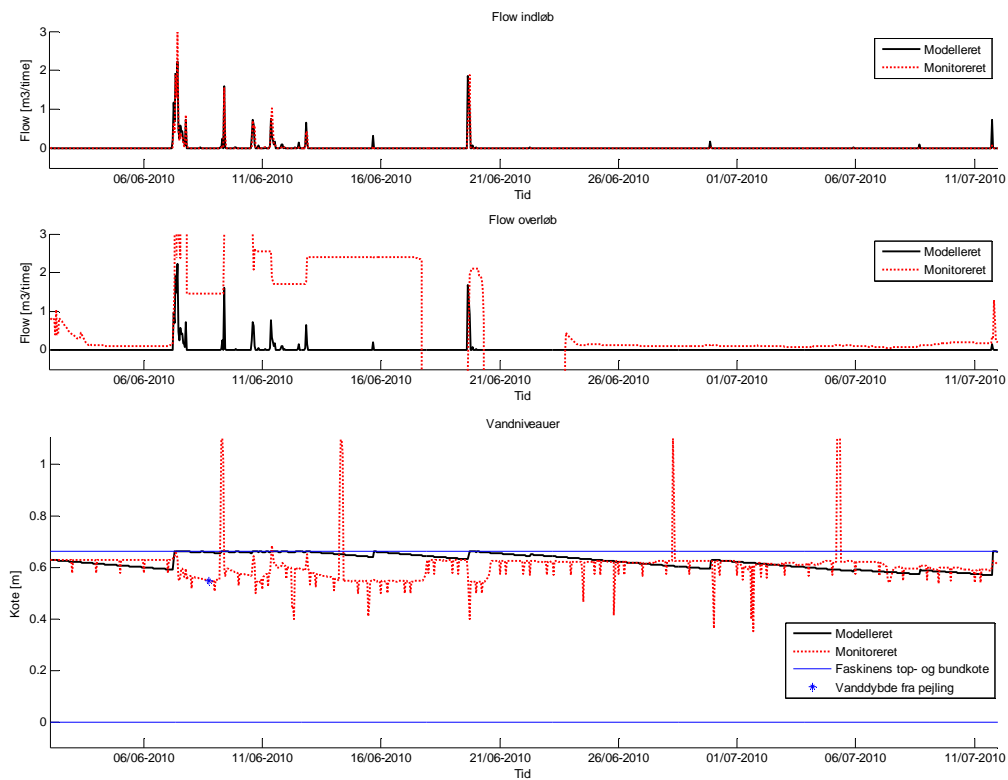
## 5.7 Massebalance model

I det følgende afsnit bliver resultaterne for modelleringen gennemgået. To måneder blev simuleret i træk af to omgange, det vil sige først april/maj og derefter juni/juli. Først gennemgås resultaterne for  $K_{s1}$  derefter for  $K_{s2}$ .

### 5.7.1 $K_{s1}$



Figur 36, Plot af de monitorerede mod de simulerede data fra massebalancemodellen fra og med 1. april til og med 31. maj. Flows er i summerede timesværdier, vandspejlet har gennemsnitlig timesværdi.  $K_{s1}:K_{bund}=K_{side}=K_s=3 \cdot 10^{-6}$ .



Figur 37, Plot af de monitorerede mod de simulerede data fra massebalancemodellen fra og med 2. juni til og med 10. juli. Flows er i summerede timesværdier, vandspejlet har gennemsnitlig timesværdi.  $K_{s1}:K_{bund}=K_{side}=K_s=3 \cdot 10^{-6}$ .

På Figur 36 og Figur 37 ses der et plot af den modellerede mod de monitorerede værdier for flow og vandspejlet i faskinen for Ks1. De monitorerede grundvandstande og de pejlede vanddybder er også indtegnet. Der ses generelt en meget god sammenhæng mellem den modellerede og målte flow ind. Værdierne passer meget godt til hinanden, noget som også kan forventes da nedbøren fra omtrent tilsvarende periode blev benyttet til at finde afstrømningskoefficienten og sammenhængen mellem data også var stor her (se afsnit 5.4). Dette, sammen med regressionsfunktionen mellem flow ind og nedbør, ser ud til at betyde, at flowmåleren ved indløbet i denne periode fungerer som den skal, og at dens resultater er pålidelige. Tidligere har der været problemer med denne flowmåler (se afsnit 5.3.2) så den bør alligevel følges op.

De monitorerede data for flowmåleren ved overløbet virker ikke sandsynligt at være korrekte, da værdierne ofte er konstante i en længere periode og stiger/falder pludselig unaturligt meget (mere om usikkerheden til flowmålerne i afsnit 5.3.2). Samtidig er værdierne af flowdataene meget større end det modellerede flow og meget større end flowet ind. Dette kunne kun være muligt om der kom store mængder vand ind i faskinen fra andre steder end indløbet. Det ses dog, at måleren reagerer og skifter værdi omtrent til starttidspunktet for et modelleret overløb. Dette tyder på at flowmåleren delvis fungerer som den skal, da den stadigvæk registrerer, at der er en ændring i flow, selvom de eksakte værdier ikke er korrekte. For juni/juli ses at modelleringen af vandspejlet i faskinen ved start og slut hænger godt sammen med de monitorerede værdier. Indimellem er der flere perioder, hovedsagligt 7.-21. juni, hvor de monitorerede data viser at vandspejlet falder meget hurtigere end den modellerede Ks1 ville tillade. I andre perioder viser de monitorerede data, at vandspejlet står tilnærmelsesvis helt stille, selvom det burde falde, da der ikke er registreret noget flow ind eller ud.

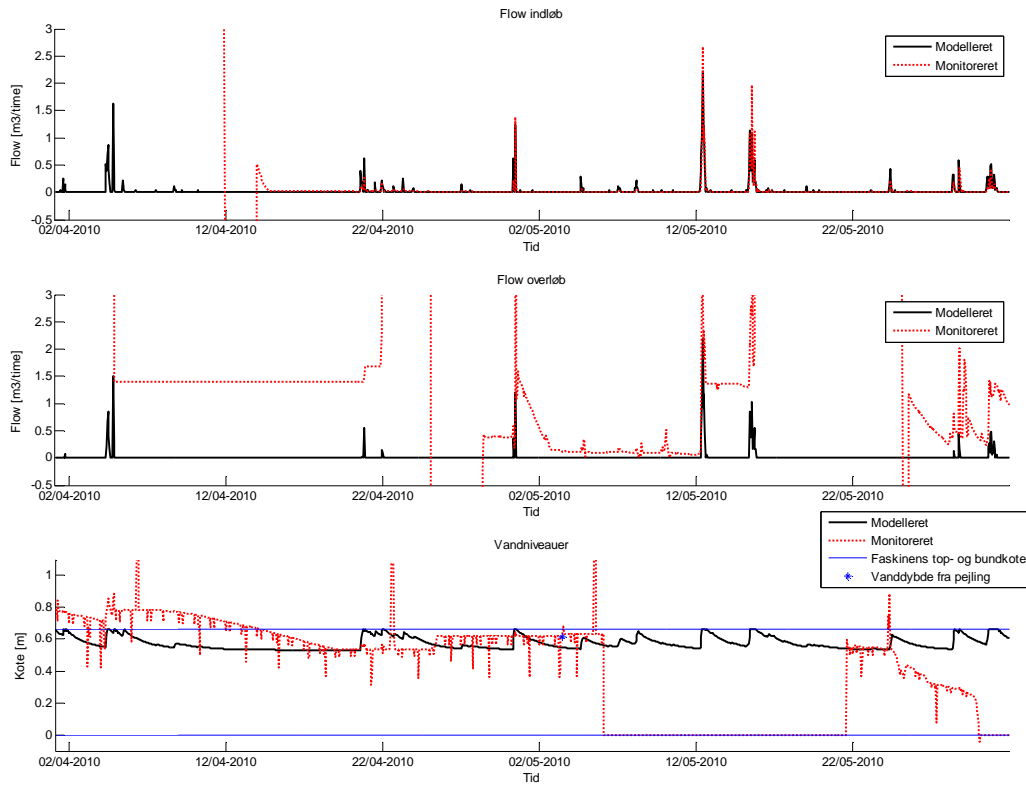
I gennemsnit passer vandspejlet fra modelleringen for april/maj også nogenlunde med de monitorerede værdier, hvis der ses væk fra de upålidelige og manglende data i slutningen af maj og vandstanden over faskinen. Generelt for både juni/juli og april/maj ses at modellen ikke beskriver systemet helt tilfredsstillende, og den største sammenhæng ses for juni/juli.

Der observeres i starten af april vandspejl, der ligger over faskinens topkote. Startkoten for vandspejlet for april/maj blev derfor valgt til at være faskinens topkote, da det ikke skulle være muligt at vandstanden er ovenover faskinens top. Grunden til at denne værdi er registreret er måske, at der er sket en opstuvning i faskinens fordelerbrønd. Hvis dette er tilfældet, ville det give god mening at sætte vandstanden i faskinens top, da det ekstra vandvolumen i fordelerbrønden vil være relativt lille i forhold til faskinens totalvolumen.

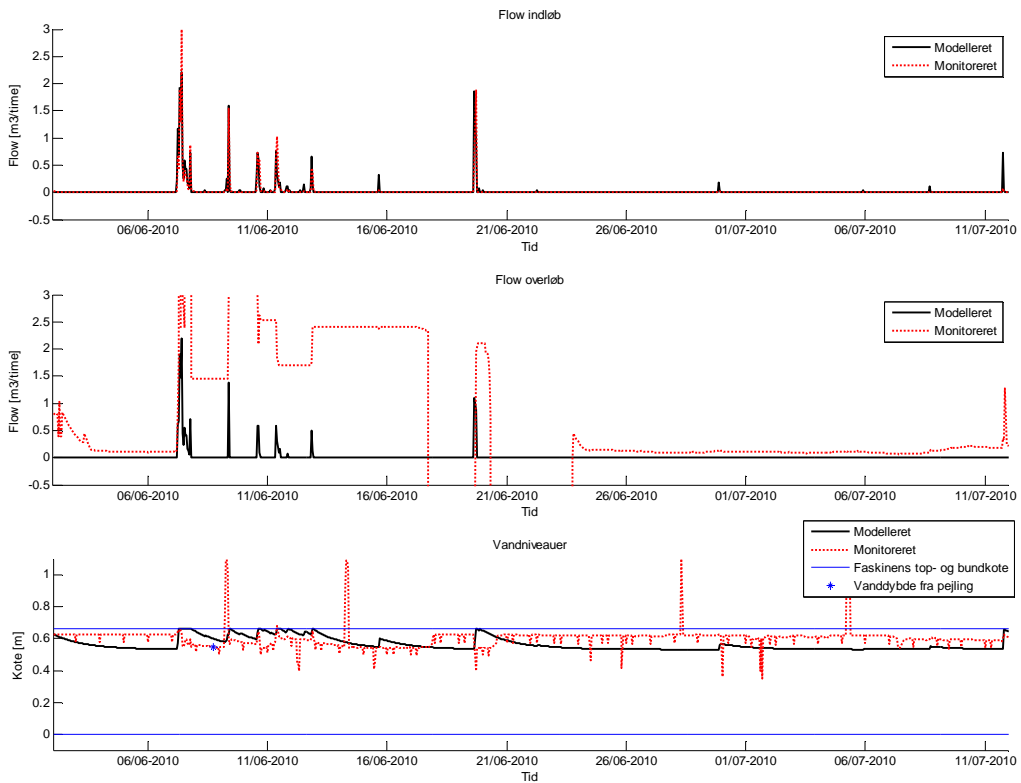
Det virker til at faskinen ikke er specielt effektiv til at nedsive regnvand, specielt da vandspejlet tilnærmelsesvis står stille i flere dage. I gennemsnit passer de monitorerede og modellerede værdier ret godt overens. Sammenlignet med andre faskiner, hvor tømningstiden typisk er på nogle dage, se afsnit 3.2.3 er faskinens opførsel uventet og processerne i faskinerne er tydeligvis mere komplicerede end det modellen beskriver. Hvad forskellen kan skyldes, om der er noget i vejen med de monitorerede data, eller om det skyldes at vandspejlet opfører sig anderledes end forudset, eller en kombination af disse, vides ikke.

### 5.7.2 Ks2

På Figur 38 og Figur 39 ses der et plot af den modellerede mod de monitorerede værdier for flow og vandspejlet i faskinen for Ks2.



Figur 38, Plot af de monitorerede mod de simulerede data fra massebalancemodellen fra og med 1. april til og med 31. maj. Flows er i summerede timesværdier, vandspejlet har gennemsnitlig timesværdi.  $K_{side} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ ,  $K_{bund} = -4,4 \cdot 10^{-6}$



Figur 39, Plot af de monitorerede mod de simulerede data fra massebalancemodellen fra og med 2. juni til og med 10. juli. Flows er i summerede timesværdier, vandspejlet har gennemsnitlig timesværdi.  $K_{side} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ ,  $K_{bund} = -4,4 \cdot 10^{-6}$

Resultaterne for flowmåleren ved indløbet er selvfølgelig de samme som ved Ks1. Resultaterne ved overløbet er også, når det gælder sammenligning med de monitorerede data, tilsvarende de resultater beskrevet for Ks1.

Det ses, at modelleringen med Ks2 giver resultater, der passer meget godt til det monitorerede vandspejl omkring den periode de er justeret ud i fra, det vil sige midten af juni. Denne periode er den eneste periode fra 1. april til 10. juli, der viser de forventede eksponentielle fald i vandstanden. Hældningerne i de eksponentielle fald for modellen og de monitorerede data svarer ret godt til hinanden. I gennemsnit passer de modellerede værdier også rimelig godt med de monitorerede i juni/juli. I perioden april/maj ses ikke helt det samme sammenhæng, men i denne periode ses der heller ikke rigtig nogen vandspejlsfald i de monitorerede data, hvis der ses væk fra det overskydende vand over faskinens top og det uforklarlige fald i slutningen af maj. I gennemsnit passer værdierne for april/maj alligevel med de monitorerede data.

Modellen med Ks2 passer ret godt til de monitorerede data, men dette er hovedsagligt i de perioder, hvor vandspejlet falder. I perioder hvor der kan antages at kun nedsivning styrer faskinens vandstand, står vandspejlet ofte tilsyneladende helt stille. Hvis der tages højde for begge perioder, kan vandstanden i gennemsnit simuleres med Ks1. Problemet er, at modellen antager, at det der sker, er konstant i tiden, mens det der observeres ud fra de monitorerede data er udsat for variationer. Selvom der ikke vides om der kan stoles fuldstændigt på de monitorerede data, da der kun er foretaget to punktvis pejlinger, virker det monitorerede vandspejl til at være nogenlunde pålideligt da pejlningen både er foretaget i en periode med faldende og konstant vandspejl. Ud fra de monitorerede data virker det til, at der er flere typer perioder, end den der er antaget ved massebalancen. Der er mindst en anden periode, hvor vandspejlet tilsyneladende står tilnærmelsesvis stille. Dette skyldes måske interaktioner mellem faskinen og grundvandet, eller at der på anden vis kommer vand ind i faskinen udenom indløbet.

### 5.7.3 Vandvolumener og kontrol af modellen

For at kontrollere, at modellen fungerede korrekt blev den simuleret med kasseregn for en hændelse både med og uden overløb. Alle flows blev summeret op og sammenlignet med volumen for at kontrollere massebalancen. Alle inputs blev desuden for kasseregningen summeret manuelt i Excel til kontrol.

Massebalancekontrollen blev også foretaget for resultaterne af simuleringen for Ks1. Alle kontrollerne gav meget tilfredsstillende resultater. Den beregnede vandspejlsændring fra de modellerede flows ved indløb og overløb passede nøjagtigt med den modellerede vandspejlsændring både for kasseregningen og for Ks1.

For kasseregningen passede kontrollen i Excel også meget godt. For modelleringerne med Ks1 var slutvandstandene på 0,654 og 0,689 for henholdsvis april/maj og juni/juli se Tabel 4.

**Tabel 4, Oversigt over samlet vandvolumen ind og ud af faskinen, samt et kontrol af massebalancen. De samlede volumener blev lagt sammen efter massebalancen ( $\Delta V = \sum Q_{ind} - \sum Q_f - \sum Q_{over}$ ) for simuleringen med K<sub>s1</sub>. Den beregnede slutvandstand = startvandstanden - ( $\Delta V / b / l / n$ ). Slutvandstanden er den sidst simulerede vandstand i fra Matlab.**

Måneder	$\Sigma Q_{over}$ [m3]	$\Sigma Q_{per}$ [m3]	$\Sigma Q_{ind}$ [m3]	$\Delta V$	Beregnet slutvandstand [m]	Slutvandstand fra model [m]
april og maj	29,80	2,80	32,58	-0,035	0,654	0,654
juni og juli	20,18	1,80	22,17	0,19	0,659	0,659
Sum	49,9891	4,6059	54,7456	--	--	--

Der blev ikke lavet en kontrol af massebalancen over hele den modellerede periode med Ks1, da der var et hul i vandniveaudata fra 30. maj til 1. juli. 1. juli var derfor ikke med i modelleringen, da der skulle være en startvandstand i starten af en simuleringsperiode.

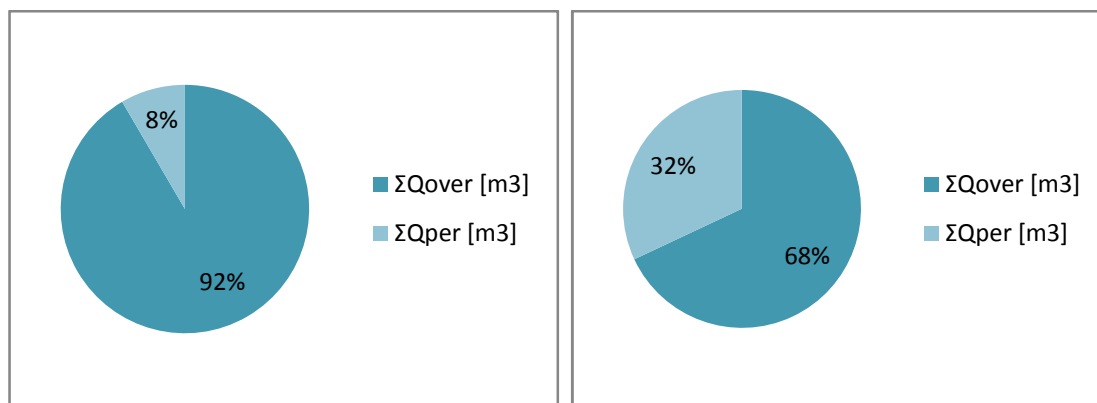
Tabellen viser at, ifølge modellen, var der med Ks1 totalt 50,0 m<sup>3</sup> i overløb og 54,7 m<sup>3</sup> vand, der kom ind i faskinen i perioden maj til 10. juli. 4,6 m<sup>3</sup>, perkolerede ud af faskinen. Dette betyder, at der i perioden kom omtrent lige meget vand ind i faskinen, som der gik ud (54,6 m<sup>3</sup>). Af vandet der gik ud af faskinen gik totalt 92 % til regnhaven mens 8 % nedsivede. For detaljer, se appendiks viii.

De samme beregninger viste, at der med Ks2 var 17,6 m<sup>3</sup> vand der nedsivede fra faskinen og der kom 37,4 m<sup>3</sup> i overløb fra faskinen til regnhaven, i perioden 1. april til 10. juli. Dette betyder, der gik totalt 55 m<sup>3</sup> vand ud af faskinen hvor 32 % nedsivede og 68 % gik i overløb til regnhaven. Se Tabel 5 for overblik over værdierne.

**Tabel 5, Oversigt over samlet vandvolumen ind og ud af faskinen for simuleringer med K<sub>s2</sub>**

Måneder	Σ Q <sub>over</sub> [m <sup>3</sup> ]	Σ Q <sub>per</sub> [m <sup>3</sup> ]	Σ Q <sub>ind</sub> [m <sup>3</sup> ]
april og maj	20,99	11,9268	32,578
juni og juli	16,4227	5,6643	22,1676
<b>Sum</b>	<b>37,4127</b>	<b>17,5911</b>	<b>54,7456</b>

Figur 40 viser for Ks1 og Ks2, hvor meget af vandet der går ud af faskinen, der går henholdsvis i overløb til regnhaven (Q<sub>over</sub>) og nedsiver fra faskinen (Q<sub>per</sub>).



**Figur 40, Diagrammer der viser hvor stor del af vandvolumen der går i overløb til regnhave (Q<sub>over</sub>) og nedsiver fra faskinen (Q<sub>per</sub>), for henholdsvis Ks1 (venstre) og Ks2 (højre).**

Med de nuværende informationer er det svært at afgøre, hvad for en Ks der giver det mest realistiske billede af jordbundsforholdene omkring faskinen på grund af de store usikkerheder. Det ses dog af data, at der er en væsentlig forskel i hvor meget af vandvolumen der nedsiver og der går i overløb for Ks1 og Ks2.

## 5.8 Gentagelsesperiode

En gentagelsesperiode defineres som antallet af overløbshændelser i løbet af en periode, hvor en overløbshændelse er et eller flere overløb gennem en hændelse. En hændelse defineres i lignende undersøgelser, f. eks Mikkelsen et al. (1998) fra faskinen er tom til den er tom igen. Da der i de pågældende

monitorerede data slet ikke kunne observeres, at faskinen var tømt blev en anden definition nødt til at indføres. Da overløbet kun har betydning for regnhaven, og regnhavens funktion i stor grad er bestemt af antal dage med vand, blev der besluttet at definere en hændelse som et døgn.

Summeret op over døgn gav modelleringen med Ks1 hele 37 overløb i perioden. Dette giver  $T=0,007$  år, det vil sige over 133,7 overløb om året, se Tabel 6. Med Ks2 fås 17 overløb i perioden, dette svarer til 61,4 overløb om året og  $T=0,016$  år. Bergeneringer kan ses i appendiks viii.

**Tabel 6, Overblik over antal overløb og gentagelsesperiode for henholdsvis Ks1 og Ks2**

	Antal overløb i perioden	Antal overløb om året	T
<b>Ks1</b>	37,00	133,71	<b>0,007</b>
<b>Ks2</b>	17,00	61,44	<b>0,016</b>

Begge gentagelsesperioder er væsentligt kortere end faskinen er dimensioneret til. Ks1 giver et T der er 13,4 gange mindre end den dimensionerede gentagelsesperiode. Ks2 giver en gentagelsesperiode, der er 6,1 gange mindre. Til sammenligning havde faskinen på Nørrebro i København undersøgt i Mikkelsen et al. (1998), en faskine der antages at have nærliggende forhold som ved EFH, en T der var 5,4 gange mindre end dimensioneret (2/0,37) efter en driftsperiode på 2,5 år.

Det er her vigtigt at få med, at faskinen blev dimensioneret med en ledningsevne, der var meget usikker. Disse faktorer kan have bidraget til at faskinen er underdimensioneret. Da vandspejlet til tider står stille i længere perioder, hvor det ville forventes at der skulle ske en nedsivning, virker det til, at der er faktorer ved faskinen, der forhindrer nedsivning, og faskinen vil dermed være yderligere underdimensioneret.

Den korte gentagelsesperiode medfører mange overløb, men overløbet sker hverken ukontrolleret eller til kloakken. Alle overløb sker til regnhaven, hvor vandet enten kan nedsive eller fordampe. Det er også vigtigt at medregne at dette er en forsøgsfaskine og relativt hyppige overløb hele tiden var ønsket. Mange små overløb fra faskinen behøver heller ikke at være kritiske. Størrelsen af overløbene, og at sammenligne disse med regnhavens kapacitet, er derfor afgørende for om regnvandet bliver håndteret lokalt ved EFH.

## 5.9 Overløb til Regnhaven

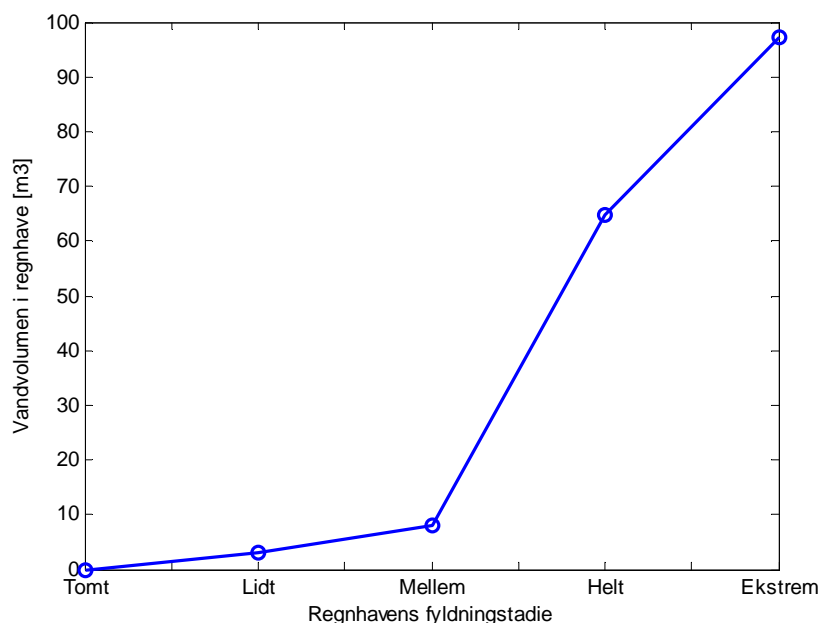
Med en årlig nedbør på 613 mm i området omkring EFH (Dmi, 2010) giver resultaterne med Ks1, at der årligt går ca. 204 m<sup>3</sup> til regnhaven, eller 17 m<sup>3</sup> om måneden. Omtrent 19 m<sup>3</sup> vand nedsiver fra faskinen. Det vil sige, at der i gennemsnit nedsiver ca. 1,6 m<sup>3</sup> om måneden, eller 51 liter om dagen. Resultaterne med Ks2 viser at der ville gå 152 m<sup>3</sup> vand til regnhaven om året, eller 12 m<sup>3</sup> om måneden. Nedsivningen ville svare til 71,4 m<sup>3</sup> om året, altså 5,9 m<sup>3</sup> om måneden, eller 194 liter per dag. Nedsivningen fra faskinen i vandvolumen med Ks2 er dermed næsten fire gange større end med Ks1. Overløbsvolumen ved Ks2 er ca. 75 % af overløbsvolumen ved Ks1. Se Tabel 7 for oversigt over tallene.



Tabel 7, Overblik over vandvolumener der går ud af faskinen udregnet fra en gennemsnitlig årsnedbør på 613mm.

	Ks1		Ks2	
	overløb	nedsivning	overløb	nedsivning
<b>m3 /året</b>	204,30	18,80	151,80	71,40
<b>m3/måned</b>	17,03	1,57	12,65	5,95
<b>l/måned</b>	--	1.568,71	--	5.946,77
<b>l/dag</b>	--	51,43	--	194,98
<b>l/time</b>	--	2,14	--	8,12

Figur 41 viser hvor meget vandvolumen der kan være i regnhaven til dens forskellige stadier af opfyldning, i henhold til de tre scenarier beskrevet i afsnit 3.3.2. Se eventuelt Figur 12 for illustration af scenarierne. Når regnhaven er lidt fyldt, vil kun den indre cirkel være fyldt med vand (scenarie 1). Når regnhaven er mellemfyldt vil den indre cirkel og den ydre ring være fyldt med vand (scenarie 2). Når regnhaven er helt fyldt vil der stå vand som i et bassin med en diameter på lidt over 8 meter, eventuelt kan noget vand ved ekstreme hændelser samle sig lige omkring regnhaven (scenarie 3). For beregning af vandvolumen i de forskellige scenarier, se appendiks ix.



Figur 41, Figur der illustrerer regnhavens kapacitet for en af tre faskiner. Lidt svarer til scenarie 1 (3 m<sup>3</sup>), mellem svarer til scenarie 2 (9 m<sup>3</sup>) og ekstrem svarer til scenarie 3 (97 m<sup>3</sup>). Scenarierne kan ses på Figur 12.

Overløbsvolumen i gennemsnit per måned fra faskinen, beregnet fra Ks1, vil svare til nogle kubikmeter over en mellemfyldt regnhave (17,0 m<sup>3</sup>). Resultatet fra Ks2 vil svare til lidt mindre vandstand, ca. lidt mere en mellemfyldt regnhave (12,7 m<sup>3</sup>). Dette er under forudsætning, at regnhaven er tom fra start, at hele

vandvolumenet kommer på en gang, og at alle tre faskiner vil overløbe med det samme volumen. Det er ikke særlig sandsynligt at hele vandvolumenet kommer på en gang, noget som vil veje op for antagelsen om en tom regnhave fra start. Faskine nummer 1 er væsentlig større end de to andre, men er også dimensioneret jævnfør dimensioneringspraksisen beskrevet i afsnit 3.2.2 og ikke til lige så hyppige overløb som faskine 2 og 3. Antagelsen om, at der bliver tilført lige mængder vand fra alle faskiner virker derfor holdbar.

En nedsivning fra regnhaven udenfor den indre cirkel vil ske relativt hurtigt da regnhaven er bygget til dette (se afsnit 3.3.2). Hvis regnhaven er mellem fyldt vil der gå under to dage før regnhaven er tilbage til 'lidt' vandstand igen. Er regnhaven helt fyldt vil der gå i underkanten af 12 dage før der kun er vand i den indre cirkel tilbage (For detaljer, se bilag ix). Dette er kun ved nedsivning, da der antages at fordampningen ikke er af afgørende betydning for så kort en periode. Der virker til, både af disse beregninger og af observationerne på stedet (se Figur 42), at regnhaven noget oftere end planlagt vil være fyldt til mellemstadiet eller mere. Fotografierne viser at regnhaven den 5. marts er næsten fyldt, 3. maj svarer til lidt under mellemfyldt stadiet. 21. maj svarer til lidt over mellemfyldt stadiet. Planen var at vandniveauet skulle være mellem 0 og 8 m<sup>3</sup>, altså mellem tomt og mellemfyldt regnhave. Det dog vigtigt at huske, at der ikke er nogen andre konsekvenser af at regnhaven er mere fyldt end planlagt andet end, at der vil stå mere vand i regnhaven og den vil fungere mere som bassin end en regnhave. Kapaciteten til regnhaven er fortsat meget større end de vandvolumener den har fået tilført. En mellemfyldt havde svaret til 8 % af regnhavens totalkapacitet. Der var også store usikkerheder, da regnhaven blev planlagt, om hvor stor den forventede variation i vandstanden ville være (19k, 2009b).

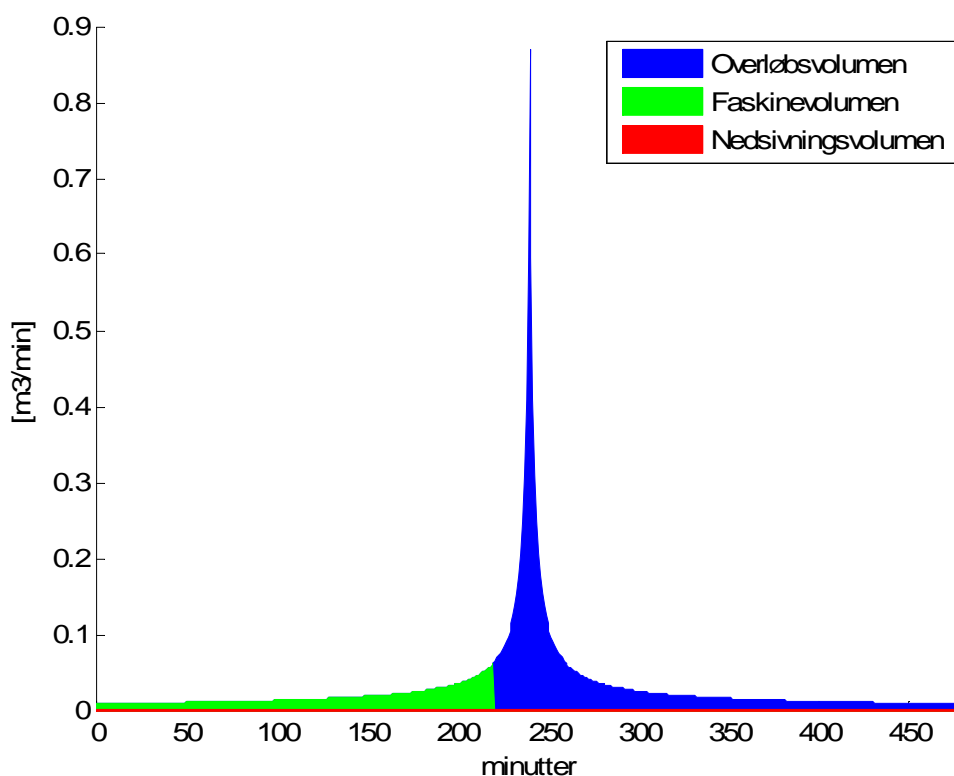


Figur 42, Fotografier af regnhaven. Fra toppen: 5. marts, 3. maj og 21. maj. 5. marts svarer til næsten fyldt stadie, 3. maj svarer til lidt under mellem stadie. 21. maj svarer til lidt over mellem stadie.

### 5.10 Faskinens kapacitet

For videre at undersøge faskinens kapacitet blev CDS regn med en gentagelsesperiode på 10 år undersøgt. Tilstrømningen til faskinen er beregnet ud fra den simple afstrømningsmodel og med den fundne afstrømningskoefficient på 0,91 (se afsnit 5.4), og metoden beskrevet i afsnit 4.2.3 blev benyttet. Den totale nedbørsvolumen er for denne hændelse  $0,042 \text{ m}^3$ , og volumen der tilføres faskinen fra oplandsarealet på  $400 \text{ m}^2$  bliver dermed  $15,4 \text{ m}^3$ . Vandvolumen er ca. 3 gange faskinens volumen på  $4 \text{ m}^3$ ,

og 11,4 m<sup>3</sup> vand løber over til regnhaven. I løbet af hændelsen nedsiver kun 0,01 m<sup>3</sup> vand. Beregningen blev kun foretaget med en nedsivning, der svarer til Ks1 (jævnfør formel 16.) og med en vandstand på en halv faskine for at beregne udsivningen fra siderne. Beregningerne blev ikke foretaget med Ks2, da dette ville give en negativ udsivning for halvfyldt faskine, og da det kunne ses at nedsivningen ikke var af afgørende betydning for beregningen af Ks1. Overløbet sker efter 222 minutter, det vil sige efter ca. 3 timer og 40 minutter. Koden til programmet for disse beregningene kan ses i appendiks x. Vandstanden i regnhaven ville dermed efter en tiårshændelse være mere end mellemfyldt, se Figur 41. Dette er over den planlagte normale vandstand, men der er alligevel også langt fra regnhavens kapacitet til ekstreme nedbørshændelser. En tiårshændelse ville kun have fyldt 18 % af vandvolumenet ved ekstremstadiet. Dette er dog under antagelsen om, at regnhaven er tom fra start af. Da regnhaven sandsynligvis ville indeholde noget vandvolumen fra start ville denne hændelse nok medføre en regnhave, der var mere fyldt med vand end de 11,4 m<sup>3</sup>. Dog er dette en tiårshændelse og en mindre belastning er derfor ventet, desuden har regnhaven fortsat kapacitet til meget større vandvolumener. Der antages at regnen ikke bruger noget tid fra taget til faskinen, da denne afstand er relativt kort, og forskellen i resultatet derfor ville være minimal. Sandsynligvis ville det på grund af transporttiden tage nedbøren et par minutter mere end 222 minutter fra nedbørshændelsens start til der sker et overløb.



Figur 43, Grafisk løsning af hvor stor del af vandvolumen fra en tiårshændelse der henholdsvis nedsiver, kan holdes tilbage i faskinen og går i overløb til regnhaven.

Da der i gennemsnit er beregnet, at det kun er 8-32 % af vandvolumen der går ud af faskinen, der nedsiver, er det tegn på at faskinen ikke fungerer helt som planlagt. Normalt dimensioneres faskiner i København, der har overløb til kloaknet, til minimum 75 % nedsivning (Københavns kommune, 2009b). Dog er dette en

faskine dimensioneret til hyppige overløb og alle overløb sker til en regnhave, som har kapacitet til det. Hermed er der ingen negative konsekvenser ved de store overløbsmængder. Alt regnvandet bliver håndteret lokalt, og enten nedsiver eller fordamper det fra regnhaven i stedet for at nedsive fra faskinen. Der er altså ingen belastning på kloaksystemet, og selv en større, sjælden regnhændelse med en gentagelsesperiode på ti år vil kunne håndteres.

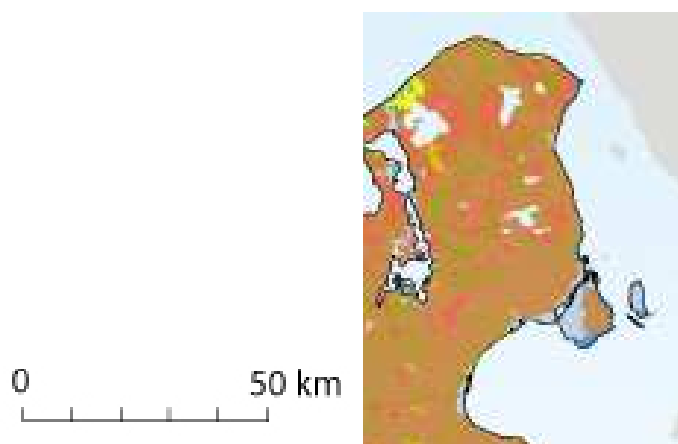
For at undersøge nærmere, hvad der forhindrer faskinen i at nedsive regnvand, kan det være et alternativ at spærre faskinen helt af og vente til den er helt tømt. Herefter kan den kunstigt fyldes med en kendt mængde vand og faskinens funktion, og jordens infiltrationskapacitet kan nærmere udforskes. Sådant et fyldningsforsøg blev også udført ved faskinen på Nørrebro (Mikkelsen et al., 1998). Fyldningsforsøget kunne eventuelt foretages for alle tre faskiner ved EFH for at få et indblik i de lokale variationer, der findes i området.

## 5.11 Perspektivering

I det følgende afsnit sammenlignes resultaterne i denne undersøgelse kort med erfaringer ved lignende forhold. På baggrund af resultaterne ved EFH og litteraturstudiet foretages en vurdering af potentialet for brugen af faskiner i Københavnsområdet.

Vandspejlet i faskinen observeres at opføre sig mere komplekst end forudsagt i denne opgaves model. Det er tydeligt, at der enten er noget i vejen med vandspejlsmålingerne, med nedsivningsforholdene eller en kombination af disse. Det svært at forudsige hvad årsagen til den begrænsede nedsivning kunne være. Undersøgelserne ved Bratthammaren i Sverige og i Tårnby i Københavnsområdet viste, at en høj grundvandstand begrænsede nedsivningen af regnvand fra faskinerne (se afsnit 3.2.3). Resultaterne ved EFH kan tyde på det samme, da grundvandstanden er høj og da de lokale variationer kan antages at være store. En i gennemsnit væsentlig lavere hydraulisk ledningsevne ved EFH, end fundet i undersøgelserne på Nørrebro, er muligvis også årsagen til, at nedsivningen sker meget langsommere ved EFH end på Nørrebro. Faskinen på Nørrebro havde en tømningstid fra fuld faskine på ca. 4 dage efter ca. to år i drift. Faskinen ved EFH er ikke på noget tidspunkt i nærheden af at være tømt. Faskinen på Nørrebro blev estimeret til at have 47 overløb årligt efter en periode på 100 år på grund af tilstopning. Dette er fortsat lavere end antallet af overløb om året beregnet til at ske ved EFH i dag, som er 134 for Ks1 og 61 for Ks2. Efter 100 år ville 60 % af regnvandet der strømmede til faskinen gå i overløb på Nørrebro. Til sammenligning ligger overløbsvolumnet på 68-92 % af vandet, der går ud af faskinen ved EFH (som er tilnærmelsesvis det samme som vandet der går ind). Faskinen på Nørrebro havde dog overløb til kloak, mens faskinen ved EFH har overløb til en regnhave. Undersøgelserne for at finde den hydrauliske ledningsevne for faskinen på Nørrebro viste også store lokale variationer, over en hel størrelsesorden for en afstand på syv meter. Desuden viste jordprøverne en variation på fire størrelsesordener (se afsnit 3.2.3). At der også er store usikkerheder omkring ledningsevnen ved EFH er derfor ikke uventet. Disse usikkerheder gør det dog svært at sammenligne forholdene ved EFH med det resterende København. Det eneste der er sikkert er at jorden ved EFH er meget leret, og den hydrauliske ledningerne nok er omkring  $10^{-6}$  og  $10^{-8}$ .

Københavnsområdet består hovedsageligt af moræneler, over 70 % af jordarterne vurderes at være moræneler (appendiks xii). Et overblik af Københavns jordarter kan ses på Figur 44



Figur 44, Jordarter som findes i de øverste meter af jordoverfladen på Østsjælland, placeringen af EFH kan eventuelt ses af Figur 10. Udklip fra GEUS (2010).

Den hydrauliske ledningsevne for moræneler spænder over flere størrelsesordner, fra  $10^{-10}$ - $10^{-6}$ , se Tabel 1. De estimerede  $K_s$  ved EFH passer meget godt ind i dette interval. For ler kan infiltrationskapaciteten variere meget (se afsnit 3.2.1), og især makroporer og vegetation kan være afgørende. Der har for nyligt været bygget på området ved EFH, og jorden kan derfor antages at have en lav infiltrationskapacitet af to grunde: komprimering af jord under byggeri ved store køretøjer, og manglen på vegetation og dermed også fauna. Disse meget lokale faktorer kan have medført, at faskinen fungerede væsentligt mindre effektivt end andre faskiner ved omtrent de samme forhold.

Jorden i Københavnsområdet er meget leret og mulighederne for nedsivning er derfor begrænset, hvor lokale forhold derfor kan være afgørende i de enkelte tilfælde. Orbicon har lavet en vurdering af hvorhen i Københavns kommune en nedsivning af regnvand er mulig (se detaljer i appendiks xii), og har udarbejdet kortet på Figur 45 til at illustrere potentialerne for nedsivning. Afgrænsningen af områder tog udgangspunkt i de følgende forhold:

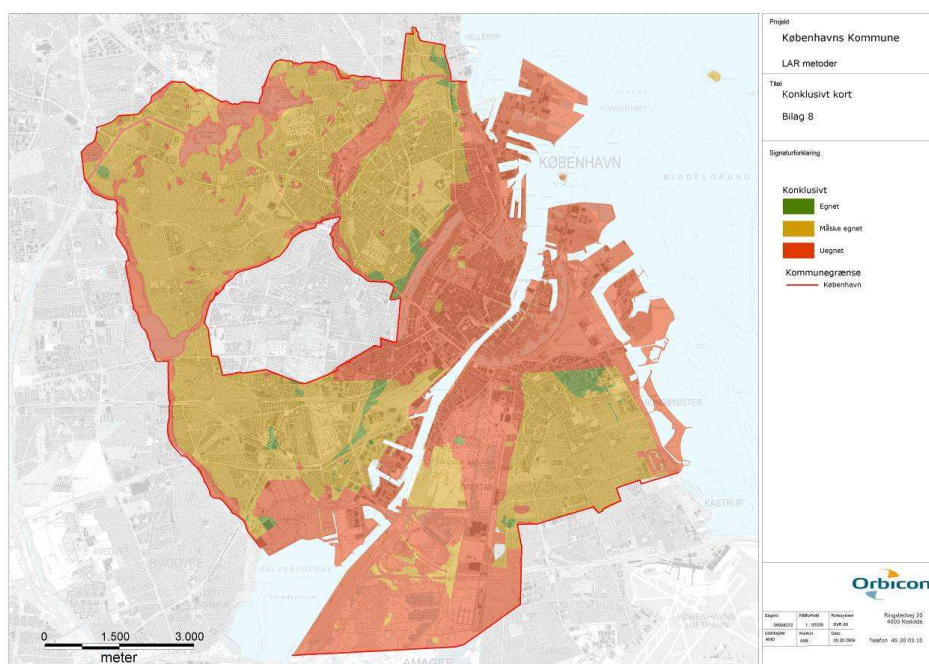
1. "Områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD områder)
2. 300 meters beskyttelsesområder omkring vandindvindingsboringer
3. 25 meter fra recipienter (vandløb og søer)
4. Jordarternes hydrauliske egenskaber
5. Afstanden til grundvandsspejlet
6. Lertykkelse og grundvandets sårbarhed overfor forurening
7. Jordforurening, V1 eller V2 kortlagte grunde
8. Separatkloakerede områder i København"

Fra appendiks xii

Rapporten anbefaler kun nedsivning i områder hvor jordbundsforholdene er sand og grus og der mindst er 3 meter fra terræn til grundvandsspejlet. Det sekundære vandspejl tages ikke med i denne vurdering.



Moræneler og grundvandsspejl mindre end tre meter under terræn defineres som 'måske egnet' til nedsivning .



Figur 45, Mulighederne for nedsivning af regnvand i Københavns kommune, baseret på listen ovenfor. Grønne områder er 'egnet' for nedsivning, gule områder er 'måske egnet' for nedsivning og røde områder er 'ikke egnet' for nedsivning. (appendiks xii)

Hvis en nedsivning i områder med moræneler er muligt viser kortet, at der i Københavns kommune er store områder med muligheder for nedsivning af regnvand. Stort set har Amager, Vesterbro, Nørrebro, Nordvest og Østerbro – altså de fleste store boligområder i kommunen – potentiale for nedsivning. De andre kort i rapporten viser, at det hovedsagligt er moræneleret der definerer disse områder som 'måske egnede' i stedet for 'egnedede' til nedsivning. Nogle forurenede grunde findes dog i disse områder, primært i Nordvest. Nedsivning af regnvand på forurenede grunde er ikke ønskeligt, men der er usikkerheder om omfanget og betydningen af de forurenede områder.

Alt i alt ses en mulighed for benyttelse af faskiner til nedsivning af regnvand i Københavnsområdet, men videre undersøgelse af faskiner samt forundersøgelser det pågældende sted, vil være nødvendigt. I mange tilfælde, så som forholdene ved EFH, vil faskiner muligvis ikke være tilstrækkeligt for at håndtere alt regnvandet lokalt. Faskiner med overløb til kloakken for forsinkelse af regnvand er også en mulighed, eller at kun dele af regnvandet fra de befæstede arealer afledes lokalt. En anden løsning kunne være faskiner i samspil med andre LAR-løsninger som for eksempel grønne tage og regnhave/bassiner med overløb til en faskine. Det er her vigtigt at få med, at det ikke nødvendigvis er en ulempe, at faskiner ikke er tilstrækkelige i sig selv, da regnhaver/bassiner og grønne tage kan have stor rekreativ værdi, og benytte regnvand som en ressource, samtidig med, at der kan skabes opmærksomhed på udfordringerne med regnvand i byer.

## 6 Konklusion

Denne opgave har undersøgt faskiner som en bæredygtig løsning til håndtering af regnvand i byer, specielt i København. En testfaskine anlagt ved EnergyFlexHouse (EFH) i Taastrup tæt på København blev undersøgt ved feltarbejde og på baggrund af online monitorerede data i perioden december 2009 til juli 2010. Faskinen har et volumen på  $4 \text{ m}^3$ , og overløb til regnhave. Oplandsarealet er et  $400 \text{ m}^2$  stort tag. En matematisk model af faskinen, baseret på en massebalance, blev sammen med de indsamlede data benyttet til at vurdere faskinens, men også regnhavens, funktion og kapacitet.

Verificeringen af de online monitorerede data viste en meget god sammenhæng mellem døgnnedbør målt med regnmåleren ved EFH og spildevandskomiteens (SVKs) regnmålere med en  $R^2$  på 0,995 og 0,979 for regnmålere henholdsvis 2,5 og 4,5 km væk. Flowmålerne derimod virkede ustabile og dele af resultaterne, specielt fra flowmåleren ved overløbet, vurderes til at være meget upålidelige. Dette skyldes, at der observeres usandsynligt store værdier og et konstant flow flere dage i træk. En direkte kontrol af flowmåleren ved overløbet var ikke mulig. Flowmåleren ved indløbet viser i perioden 1. maj-10. juli en meget god sammenhæng med regnmåleren ved den simple afstrømningsmodel ( $Q=CiA$ ) med en  $R^2=0,98$  for akkumuleret nedbør og volumen på døgnskala. Afstrømningskoefficienten til oplandsarealet,  $C$ , blev ud fra dette beregnet til 0,91.

De monitorerede vandniveauer blev justeret til absolutte koter på baggrund af to vandstandspeglinger, den 3. maj og den 8. juni, til -2,00 cm for faskinen, -105 cm for G0.5 og -115 cm for G2.0. Faskinens bund blev benyttet som udgangsniveau. Disse justerede vandniveauer viser at vandstanden i faskinen gennem hele perioden har været meget høj. Den laveste vandstand er observeret i februar, hvor faskinen er ca. 75 % fyldt. Vandstanden over faskinens topkote er også registreret i en sammenhængende periode fra marts til midt april, dette skyldes muligvis en opstuvning i faskinens fordelebrønd. Grundvandstanden omkring faskinen er relativt høj, omtrent på niveau med faskinens bund og i perioder op til ca. 10 cm over faskinens bund. Der er dog en konstant hydraulisk gradient ud af faskinen, på i gennemsnit 1,5 til G0.5 og på 0,3 til G2.0.

Der er registreret længere perioder, hvor vandspejlet står tilnærmelsesvis stille, selv om vandspejlet forventedes at falde, da der hverken registreredes flow ved indløbet eller overløbet i denne periode. Dette medførte at massebalancemodellen havde problemer med at simulere den monitorerede vandstand. Årsagen til vandspejlets uventede opførsel kan være, at der er fejl i de online monitorerede vandniveaudata. Det kan også skyldes, at der er noget, der ikke bliver beskrevet i denne opgaves simple massebalancemodel, der, eventuelt periodevis, forhindrer faskinen at fungere særlig effektivt. Da grundvandstanden er høj i dette område, er det en mulighed, at den lokale variation i grundvandsspejlet til tider har medført interaktioner mellem faskine og grundvand, noget som kan have påvirket faskinens funktion og forhindret perkolation ud af magasinet. Dette er dog kun en antagelse, og flere grundvandsmålinger langs faskinen eller et kontrolleret fyldningsforsøg ville måske kunne opklare dette.

Den mættede hydrauliske ledningsevne for jorden omkring faskinen blev estimeret til  $Ks1$  ( $Ks=3,0 \cdot 10^{-8}$  m/s) for bund og sider på baggrund af målinger med permeameteret samt kalibrering til de monitorerede data. Værdien er en faktor tre mindre end den målt med permeameteret, noget der anses som rimeligt, de andre usikkerheder ved denne type måling taget i betragtning. På grund af det meget langsomme fald i vandspejlet var det problematisk at estimere ledningsevne ud fra vandspejlsænkningen i faskinen. En enkelt periode, 13-14. juni, var den eneste der gav et brugbart resultat. Dette resultat,  $Ks2$  ( $K_{side}=3,0 \cdot 10^{-6}$  og  $K_{bund}=-4,4 \cdot 10^{-8}$ ) indebærer, at der antages et konstant flow af vand ind gennem faskinens bund. Begge ledningsevner simulerede med massebalancemodellen nogenlunde den monitorerede vandstand i faskinen. I gennemsnit, og til start- og slutvandstandene passer  $Ks1$  bedst.  $Ks2$  beskriver godt de perioder, hvor vandstanden falder eksponentielt. Begge  $Ks$  værdier anses for relativt usikre og da det ikke var muligt at estimere, hvad for en der var mest realistisk, blev begge benyttet i modelleringen.

Da vinteren 2009-2010 havde unormalt store mængder nedbør, der faldt som sne, og massebalancemodellen ikke havde snesmeltning med – samt det faktum, at der har været problemer med at få pålidelige data fra flowmålerne – blev kun perioden fra og med 1. april til og med 10. juli simuleret i massebalancemodellen. Resultaterne viste, med  $Ks1$  at der forekom 37 overløb i perioden, det vil sige  $T=0,007$  år. Med  $Ks2$  forekom der 17 overløb i perioden det vil sige  $T=0,016$  år. Dette er en gentagelsesperiode der er henholdsvis 13,4 og 6,1 gange mindre end den dimensionerede  $T=0,1$ .

Overløbsvolumenen udgjorde i perioden 92 % for  $Ks1$  og 68 % for  $Ks2$  af det vandvolumen, der gik ud af faskinen, mens de resterende 8 % for  $Ks1$  og 32 % for  $Ks2$  nedsivede fra faskinen. Med en årsnedbør på 613 mm i området medfører dette, at der på baggrund af  $Ks1$ , om måneden kommer i gennemsnit  $17,0 \text{ m}^3$  vand til regnhaven fra faskinen, mens  $1,6 \text{ m}^3$  vand nedsiver. For  $Ks2$  er der  $12,7 \text{ m}^3$  overløb og  $5,9 \text{ m}^3$  nedsivning. Regnhaven har en kapacitet på op til  $97 \text{ m}^3$  pr faskine, men bør normalt kun have et vandvolumen mellem  $0-8 \text{ m}^3$ . Med et overløbsvolumen fra faskinen på i gennemsnit  $13-17 \text{ m}^3$  om måneden kan der overslagsmæssigt siges at regnhaven i gennemsnit vil være lidt mere fyldt en planlagt, men stadig have stor kapacitet tilbage. Ved CDS regn med  $T=10$  år, vurderes det, at regnhaven vil tilføres  $11,4 \text{ m}^3$  vand. Overløbet fra faskinen sker knapt fire timer efter nedbørshændelsens start, men dette overløbsvolumen er kun 18 % af regnhavens kapacitet til ekstremregn. Regnhaven vurderes derfor til at fungere tilfredsstillende, om end til tider mere som et bassin end som en regnhave.

Resultaterne i denne opgave viser at faskinen ikke fungerer særligt effektivt. Det er dog vigtigt at medregne, at dette er en testfaskine som er designet til hyppige overløb. Samtidig er det vigtigt at få med at overløbene fra faskinen overhovedet ikke har nogen negative konsekvenser, da regnvandet i stedet enten nedsiver eller fordamper fra regnhaven. Regnvandet ved EFH bliver således 100 % håndteret lokalt.

Forholdende ved EFH minder om det resterende København, der har høj grundvandstand og leret jordbund. Mangelen på detaljer, og usikkerheden i målingerne gør det dog svært at afgøre hvad denne undersøgelse har at sige for Københavnsområdet. Resultaterne, sammenlignet med lignende undersøgelser, tyder på at forholdende ved EFH generelt er dårligere til at nedsive regnvand end det resterende Københavnsområde. For eksempel havde en faskine på Nørrebro en tømningstid fra fuld faskine på ca. 4 dage. Nedsivning fra faskinen er dog et faktum, og regnhaven håndterer det resterende regnvand lokalt.

Alt i alt peger dette i retning af, sammen med tidligere lignende undersøgelser, at det er muligt at nedsive regnvand i lerområder som København. Lokale forhold som makroporer og grundvandsspejlets højde kan dog være afgørende. Faskiner kan være en bæredygtig måde at håndtere regnvand på, men ved forhold med leret jord og højt grundvandsspejl vil det nok ofte være nødvendigt at faskiner fungerer i samspil med andre metoder for LAR, som for eksempel regnhaver.

## 7 Kilder

### *Artikler, bøger og internetsider*

(Å.u betyder kilden har et ukendt udgivelsesår).

19k (2008): *Notat vedr. Håndtering af regnvand, udarbejdet sept. 2008, rev. 7. oktober 2008*, link: [http://www.19k.dk/\\_root/media/35155%5FNotat.%20H%E5ndtering%20af%20regnvand%20sept.%2008%2C%20rev.%20071008.pdf](http://www.19k.dk/_root/media/35155%5FNotat.%20H%E5ndtering%20af%20regnvand%20sept.%2008%2C%20rev.%20071008.pdf), Besøgt 12/5-2010

19k (2009a): Teknologisk Institut. Faskiner og regnbed ved EFH, link:<http://www.19k.dk/idekatalog/26508>, Besøgt 20/5-2010

19k (2009b): Energy Flex House på TI – Etablering af tre nye faskiner med overløb til regnhave , Artikel i Entreprenøren juni 2009, Tilgængelig på: [http://www.19k.dk/\\_root/media/35152\\_Artikel%20til%20Entrepren%F8ren%20juni%202009.pdf](http://www.19k.dk/_root/media/35152_Artikel%20til%20Entrepren%F8ren%20juni%202009.pdf). Besøgt 6/5-2010

19k (2009c): *Notat vedr. regnbed ved flexhus på TI den 16. marts 2009*, link: [http://www.19k.dk/\\_root/media/35154\\_Notat%20vedr.%20regnbed%20marts%202009.pdf](http://www.19k.dk/_root/media/35154_Notat%20vedr.%20regnbed%20marts%202009.pdf), Besøgt 22/4-2010

19k(2009d) : *Teknologisk Institut. Faskiner og regnbed ved EFH, bilag*, link: <http://www.19k.dk/idekatalog/26508,2>, Besøgt 20/5-2010

19k (å.u.): *Scenarier for regnbed*, link : [http://www.19k.dk/\\_root/media/35160\\_Scenarier%20for%20regnbed.pdf](http://www.19k.dk/_root/media/35160_Scenarier%20for%20regnbed.pdf), Besøgt 8/7-2010.

Anthonisen, U.; Faldager, I.; Hovgaard, J.; Jacobsen, P.; Mikkelsen, P.S., (1992): *Lokal afledning af regnavnd, spildevandsforskning fra miljøstyrelsen*, nr. 36., Miljøministeriet, miljøstyrelsen.

Arnbjerg-Nielsen, K., (2008): *Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer*, Spildevandskomiteen, Skrift nr. 29, IDA Spildevandskomiteen.

Bergmann, M., (2009): Dimensioning of soakaways for stormwater infiltration at the EnergyFlexHouse site, Teknologisk institut, 2009-01-21, link: [http://www.19k.dk/\\_root/media/35153\\_Hydrauliske%20beregninger%20v%20Maria%20Bergman%20DTU%20Milj%F8.pdf](http://www.19k.dk/_root/media/35153_Hydrauliske%20beregninger%20v%20Maria%20Bergman%20DTU%20Milj%F8.pdf), Besøgt 4/5-2010

Bergman, M., Hedegaard, M.R., Petersen, M.F., Binning, P., Mark, O. and Mikkelsen, P.S. (2010): *Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation*. Proc. 7th Int. Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management - NOVATECH 2010. 26 June – 1 July, 2010, Lyon, France.

Binning, P.; Bauer-Gottwein, P.,(2009): *Lecture notes, Course 12320: Hydrology*, DTU.

Brutsaert, W., (2005): *Hydrology, An introduction*, Ca.mbridge university press, fourth printing 2009.

Chocat, B.; Ashley, R.; Marsalek, J.; Matos, M. R.; Rauch, W.; Schilling, W.; Urbonas, B.,(2007): *Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water*, Indoor Built Environ, 2007 , 16, 272–285.

Dingmad, S.L., (2002): *Physical Hydrology* (2nd Ed.), prentice hall, New Jersey.

Dmi (2009): Fortidens klima, nedbør og sol i Danmark. Tilgængelig på:  
[http://www.dmi.dk/dmi/index/klima/klimaet\\_indtil\\_nu/nedboer\\_og\\_sol\\_i\\_danmark.htm](http://www.dmi.dk/dmi/index/klima/klimaet_indtil_nu/nedboer_og_sol_i_danmark.htm). Besøgt 21/3-2010

Dmi (2010): Klimanormaler for Danmark, Link:  
<http://www.dmi.dk/dmi/index/danmark/klimanormaler.htm>, Besøgt 21/7-2010.

Duchene, M.; McBean, E. A.; Thomson, N. R., (1994): *Modeling of Infiltration from Trenches for Storm-Water Control*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, No. 3, 1994

Elrick, D. E.; Reynolds, W. D. (1992): *Methods for analyzing constant-head well permeameter data*, Soil Science Society of America Journal, 1992, vol 56. Nr 1, page 320.

Ferguson, B. K.,(1994): *Stormwater Infiltration*, CRC Press, Lewis Publishers, 1994

Fetter, C. W., (2001): *Applied Hydrogeology* , 4<sup>th</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey.

Freni G.; Mannina, G.; Viviani, G.,(2009): *Stormwater infiltration trenches: a conceptual modeling approach*, Water Science and Technology, 2009, vol. 60, no 1, pp 185-199.

GEUS (2000): Grundvandsovervågning 1999; Grundvandsressourcer. Tilgængelig på:  
<http://www.geus.dk/geuspage-dk.htm?http://www.geus.dk/publications/grundvandsovervaagning/g-o-1999.htm>), Besøgt 26/7-2010.

GEUS (2010): *Viden om: Grundvand... en livsvigtig ressource; overheads; Jordarter*. Link:  
[http://www.geus.dk/viden\\_om/gv08-dk.html](http://www.geus.dk/viden_om/gv08-dk.html), Besøgt 17/3-2010.

Holman-Dobbs, J. K.; Bradley, A. A.; Potter, K. W.,(2003) *Evaluation of Hydrologic Benefits of Infiltration Based Urban Storm Water Management*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 2003, 39(1):205-215.

Homstrand, O; Lind, B; Lindvall P; Lars-Ove Sörman, (1980) *Perkolationsmagasin i ett lerområde, Lokalt omhändertagande av dagvatten i Bratthammar*, Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande 54, Göteborg 1980

Ingeniøren (2009a), *Eksperter: Se nu at få renoveret landets kloakker*, Tilgængelig på:  
<http://ing.dk/artikel/104165-eksperter-se-nu-at-faa-renoveret-landets-kloakker> .Besøgt 20/3-2010

Ingeniøren (2009b), *København går glip af milliarder: private kobler ikke regnvand fra kloak*, Tilgængelig på:  
<http://ing.dk/artikel/104647-koebenhavn-gaar-glip-af-milliarder-private-kobler-ikke-regnvand-fra-kloak>. Besøgt 20/3-2010.

IDA spildevandskomiteen (1994), *Nedsivning af regnvand – dimensionering*. Spildevandskomiteens skrift nr. 25.

ISCO (2010a), *2150 Area Velocity Module*, link:

<http://www.isco.com/products/products3.asp?PL=2021010>. Besøgt 16/6-2010.

ISCO (2010b), *2105 Network Interface Module*, link:

<http://www.isco.com/products/products3.asp?PL=2021057>. Besøgt 16/6-2010

Københavns energi (2009), *Du kan få tilskud til at slippe af med dit regnvand: Få en faskine*, Tilgængelig på:

[http://www.ke.dk/portal/page/portal/Privat/Nyt\\_fra\\_KE\\_maj2009/Faa\\_en\\_faskine?page=656](http://www.ke.dk/portal/page/portal/Privat/Nyt_fra_KE_maj2009/Faa_en_faskine?page=656). Besøgt 9/4-2010

Københavns Kommune (2010), *Lokal afledning af regnvand: Metoder*. Tilgængelig på:

<http://www.kk.dk/Borger/BoligOgByggeri/Byggetilladelse/VandOgAfloeb/LokalAfledningAfRegnvand/Metoder.aspx>. Besøgt 4/5-2010.

Københavns kommune (2009a), *LAR projekthåndbog*,

<http://www.kk.dk/Borger/BoligOgByggeri/Byggetilladelse/VandOgAfloeb/LokalAfledningAfRegnvand/LAR-Metodehaandbogen/Vurderingsvaerktoej/~media/41AFBD1C5CF840AB994CF3A219CA.89E6.ashx>

Københavns kommune (2009b), *LAR projekthåndbog, bilag til projekthåndbogen: anvisning til hydraulisk dimensionering af LAR-løsninger*, link:

<http://www.kk.dk/Borger/BoligOgByggeri/Byggetilladelse/VandOgAfloeb/LokalAfledningAfRegnvand/YderligereOplysninger/~media/798C1632434C41EEBC78B9E4989047AE.ashx>. besøgt 23/7

Københavns Kommune, (1999) *Faskiner*, udarbejdet af: Rambøll Danamrk A/S; Erling Holm ApS; KU, Skov og Landskab; DTU Miljø; Orbicon A/S, Københavns kommune, juni 2009.

Lindvall, P.; Hogland, W., (1981): *Rapport, Driftsaspekter på dagvatteninfiltration*, Byggforskningsrådet, R14, Statens råd for bygnadsforskning, Stockholm.

Mikkelsen, P. S., (1995) *Hydrologica.l and Pollutional Aspects of Urban Stormwater Infiltration*, Ph. D. thesis, institute of environmental science and engineering, Technical University of Denmark, September 1995.

Mikkelsen, P.S.; Jacobsen, P., (1993): *Dimensionering af anlæg til lokal afledning af regnvand*, forskningsgruppen omkring urbane afstrømninger, Lokal Afledning af Regnvand, Danmarks Tekniske Højskole.

Mikkelsen, P.S., Viklander, M., Linde J.J., Malqvist, P.-A, (2002): *BMPs in urban stormwater management in Denmark and Sweden*. In: Urbonas, B. (Ed.): Proc. Eng. Fnd. Conf. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation, Aug 19-24 2001, Snowmass Village, Colorado/USA, pp. 354-368. American Society of Civil Engineers.

Miljøstyrelsen (2006) *Katalog over tiltag til reduktion af effekten fra klimaændringer på afløbssystemer – Tillægsrapport: 2, Fremskrivning af regn over Danmark*, link:



<http://www2.mst.dk/common/Udgivramme/Frame.asp?http://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2006/87-7052-255-3/html/kap02.htm>. besøgt 22/7-2010.

Nazaroff, W. W.; Alvarez-Cohen, L., (2001): *Environmental Engineering Science*, John Wiley & Sons Inc.

NC Water (2010), *Basic Hydrogeology*, link:

[http://www.ncwater.org/Education\\_and\\_Technical\\_Assistance/Ground\\_Water/Hydrogeology/](http://www.ncwater.org/Education_and_Technical_Assistance/Ground_Water/Hydrogeology/). Besøgt 8/3-2010.

Nielsen, M. K., (2001): *DANMARKS METEOROLOGISKE INSTITUT TEKNISK RAPPORT, 01-01, Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem, Årsnotat 2000*, Copenhagen, februar 2001.

Nielsen S. C.; Petersen, K.; Helsingreen H.; Faldager, I.; Møller, M.; Ohlsen, B.; Villadsen, I.; (2001): *Udvikling af pakkeløsninger til etablering af faskiner ved hjælp af no-dig teknik, Økologisk byfornyelse og spildevandsrensning*, Nr. 8 2001, Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet.

Nyrup plast a/s (2010): *Lovgivning om regnvandsanlæg*, Link: <http://www.regnvand.com/lovgivning.htm>, Besøgt 10/7-2010.

Rørcenteret, (2005): *Nedsivning af regnvand i faskiner, Vejledning i projektering, dimensionering, udførelse og drift af faskiner, Rørcenter anvisning 009*, Teknologisk Institut, Juni 2005.

Siriwardene, N. R.; Deletic, A.; Fletcher, T. D., (2007): Modeling of sediment transport through stormwater gravel filters over their lifespan, *Environmental Science and Technology*, 2007, vol 41, no 23.

Sieker, F., (1998): On-site Stormwater management as an alternative to conventional sewer systems: a new concept spreading in Germany, *Water Science and Technology*, 1998, vol 38, no 10, pp 65-71

Solimoisture equipment corp. (2005): *2800K1; Model 2800K1 Guelph Permeameter; Operating instructions*.

Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Alley, R.B.; Berntsen, T.; Bindoff, N.L.; Chen, Z.; Chidthaisong, A.; Gregory, J.M.; Hegerl, G.C.; Heimann, M.; Hewitson, B.; Hoskins, B.J.; Joos, F.; Jouzel, J.; Kattsov, V.; Lohmann, U.; Matsuno, T.; Molina, M.; Nicholls, N.; Overpeck, J.; Raga, G.; Ramaswamy, V.; Ren, J.; Rusticucci, M.; Somerville, R.; Stocker, T.F.; Whetton, P.; Wood R.A.; Wratt, D. (2007): *Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Spildevandskomiteen, (2010): Diagram lavet med excelark 'Regional CDS Ver \_3.0' nedladet fra *Spildevandskomiteens skrift nr. 28: Regional variation af ekstremregn i Danmark - ny bearbejdning (1979-2005). Højere dimensiongivende regnintensiteter i Danmark*. Link: <http://svk28.env.dtu.dk/>, besøgt 19/7-2010

Styregruppen for spildevandskomiteens regnmålersystem (2006): *Regneark til bestemmelse af regnkurver og CDS regn, teknisk dokumentation og vejledning*, version 3.0, DHI, September 2006.

Teknologisk Institut (2009): *EnergyFlexHouse, udvikling af energieffektiv teknologi til de globale udfordringer*, link: [http://www.teknologisk.dk/\\_root/media/36141\\_EFH%20publikation%20final%20low.pdf](http://www.teknologisk.dk/_root/media/36141_EFH%20publikation%20final%20low.pdf)

Teknologisk institut (2010) *Undersøgelsesmetoder*, link: <http://www.teknologisk.dk/20887,6>, besøgt 16/6-2010

YOUNG (2010), *Tipping Bucket Rain Gauge*, link: <http://www.youngusa.com/products/3/18.html>, besøgt 10/5-2010.

Vestergren 2010 Fra sverige marts 2010: <http://www.chemeng.lth.se/exjobb/E568.pdf>

Woods-Ballard, B.; Kellagher, R.; Martin, P.; Jefferies, C.; Bray, R.; Shaffer, P.,(2007): *The SUDS manual*, CIRIA C697, CIRIA.

Ørum & Jensen Elektronik A/S (2010a); *SH3500, SH3501, SH3502 Ø19mm, vandstandspejler for borehuller*; Tilgængelig på <http://www.orumjensen.dk/>; Niveaumålere; SH3500; besøgt 17/5-2010.

Ørum & Jensen elektronik A/S (2010b); *Niveaumåler type 3100*. Tilgængelig på: <http://www.orumjensen.dk/Niveaumålere;3100>; besøgt 17/5-2010

### *Personlig kommunikation*

Pers.kom. Eisum (2010), Email fra Niels Henrik Eisum, DHI

ISCO-måleren kan godt måle lavere vandstand end 2.5 cm, men hastighedsmåleren er afhængig af mindst 2.5 cm vand. Min erfaring er dog, at den nærmere skal have 5 cm før der er signal nok til at man kan tro på resultatet af målingen. Samtidig skal der helst være nogle partikler i vandet, hvilket der heller ikke rigtig er her, så der kræves temmelig meget vand før der kan bestemmes en hastighed.

**From:** "Niels Henrik Eisum" <nhe@dhigroup.com> **Date:** Thu, May 13, 2010 18:25

Pers. kom. Arnbjerg-Nielsen (2010), Email fra Karsten Arnbjerg-Nielsen, DTU Miljø.

"The gauge we use (SVKs raingauges) is designed for extreme intensities and precise volumetric registration of precipitation. This design also means that the gauge is not very good at measuring low intensities and poor in measuring snow "

**From:** "Karsten Arnbjerg-Nielsen" <karn@env.dtu.dk> **Date:** Mon, July 26, 2010 10:04

Pers. kom. Skov (2010): Samtale med Bent Skov, 'Head of Labsection' DTU Miljø, den 23/3-2010.

## 8 Appendiks

- i) Dimensionering af faskine 2 og 3
- ii)  $\alpha$  og C værdier til permeameteret
- iii) Matlab-script: Massebalancemodel
- iv) Pejling og nivellering
- v) Permeameteret
- vi) Vedrørende faskinens dimensioner
- vii) Hydraulisk gradient
- viii) Vandvolumner fra faskinen
- ix) Regnhave
- x) Matlab-script: CDS-regn og overløb
- xi) Installationsvejledning RIGO-Fill
- xii) Nedsivningskort

## i) Dimensionering for faskine 2 og 3

Teknik- og Miljøcenter  
Høje-Taastrup Kommune  
Bygden 2  
2630 Taastrup  
Att: Jan Bonne Pedersen og Miljøchef Hanne Jørgensen

Tåstrup, den 1. juli 2009

Vedr.: Oplysninger om dimensionering for faskine 2 og 3 i forbindelse med Energy Flex House på Teknologisk Institut

I henhold til vores tidligere skrivelser af 7. og 17. oktober samt Deres nedsivningstilladelse af 3. november fremsendes hermed oplysninger om dimensionering af faskine 2 og 3

De udførte håndberegninger af faskine-volumerne er foretaget som beskrevet i "Notat vedr. Håndtering af regnvand, udarbejdet sept. 2008, rev. 7. oktober 2008", der var vedlagt ansøgningen.

Der er efterfølgende (januar 2009) foretaget hydrauliske beregninger på DTU, se bilag 1.

### **Faskine 2:**

I selve detailprojekteringen af faskine 2 er det fastlagt, at der benyttes faskineposer med Leca-sten fra firmaet Saint-Gobain Weber (se <http://www.weber.dk/leca/Default.asp>). Hver faskinepose har dimensionen  $l \times b \times h = 1100 \times 500 \times 200$  mm (i alt 110 liter) og rummer 100 l leca sten.

Materialet er valgt, så det er muligt at få erfaringer med andre faskiner end faskiner opbygget af plastkassetter. Tilløb til faskinen fordeles via et fordelerrør imellem faskineposerne. Der etableres desuden et overløb i toppen af faskinen, der leder til det regnbed, der skal etableres.

Dimensionering af faskine 2 fremgår af vedlagte bilag 1.

Beregningerne i bilag 1 er lavet under forudsætning af, at faskine 2 vil modtage regnvand fra tagarealet fra 1 bygning samt det befæstede areal rundt om bygningen. Det er usikkert, om al regnvandet fra det befæstede areal omkring bygningen vil ledes til faskine. Der kan ske en større afledning til de omkringliggende græsarealer.

Da det ønskes, at der sker hyppige overløb til regnbedet, så det er muligt at måle på overløb af faskinen, er faskinen bevidst valgt for lille. Det ønskes, at voluminet er  $4 \text{ m}^3$ . Faskinen skal derfor opbygges af i alt 40 faskineposer (1 i bredden, 2 i højden, 20 i længden), så udsivningsarealet er størst muligt.

Ønsket volumen af faskineposer i faskine 2:  $4,4 \text{ m}^3$  (heraf  $4,0 \text{ m}^3$  leca-sten)

Længde: 10,0 m

Bredde: 1,1 m

Højde: 0,4 m

### **Bilag:**

1. Dimensioning of soakaways for stormwater infiltration at the EnergyFlexHouse site, Teknologisk Institut v/ Maria Bergman, 2009-01-21

### **Faskine 3:**

I selve detailprojekteringen af faskine 3 er det fastlagt, at der benyttes Rigo-fill elementer fra Nyrup Plast A/S, se [http://www.regnvand.com/images/Rigo-fill\\_brochure.pdf](http://www.regnvand.com/images/Rigo-fill_brochure.pdf). Elementerne har hver dimensionerne l x b x h = 800 x 800 x 665 mm.

Adgang til faskinen sikres via et opføringsrør i forbindelse med tilløbet til faskinen. Der skal være et tilløb i toppen af faskinen samt et overløb i toppen af faskinen, der leder til regnbedet.

Dimensionering af faskine 3 fremgår af vedlagte bilag 1.

Beregningerne i bilag 1 er lavet under forudsætning af, at faskine 3 vil modtage regnvand fra tagarealer fra 2 bygninger samt det befæstede areal rundt om bygningerne. Det er pt. tvivlsomt, hvorvidt det sidste flexhus vil blive bygget, hvorved faskinen kun modtager regnvand fra 1 bygning. Desuden er det usikkert, om al regnvandet fra de befæstede arealer omkring flexhusene vil ledes til faskine. Der vil sandsynligvis ske en større afledning til de omkringliggende græsarealer.

Da det har stor betydning for det planlagte måleprogram at der sker overløb til regnbedet, ønskes det, at faskinen bevidst dimensioneres for lille.

Med den store usikkerhed på størrelsen af de befæstede arealer, ønskes det, at faskinen skal være ca. 4 m<sup>3</sup>. Faskinen opbygges derfor af i alt 10 Rigo-fill elementer, der placeres i én lang række (1 i bredden, 1 i højden), så udsivningsarealet bliver størst muligt.

Beregnet volumen: 4,26 m<sup>3</sup>

Længde: 6,65 m

Bredde: 0,8 m

Højde: 0,8 m

Hvis der er spørgsmål til ovenstående, bedes I kontakte undertegnede på tlf. 72 20 22 87.

Med venlig hilsen  
Teknologisk Institut

Hanne Kjær Jørgensen

Tlf.: 7220 2287

Email: [hanne.jorgensen@teknologisk.dk](mailto:hanne.jorgensen@teknologisk.dk)

### **Bilag:**

1. Dimensioning of soakaways for stormwater infiltration at the EnergyFlexHouse site, Teknologisk Institut v/ Maria Bergman, 2009-01-21

## ii) $\alpha$ og C-værdier til Permeameteret

*Tabel til estimering af  $\alpha^*$ , og den tilhørende C-værdi:*

Soil Texture – Structure Category	$\alpha^*$ (cm <sup>-1</sup> )	C
Compacted, structureless, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments etc.	0,01	C3
Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.	0,04	C2
Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.	0,12	C1
Coarse and gravelly sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropores, etc.	0,36	C1

(Solimoisture equipment corp, 2005)

*Formler til beregning af C:*

$$C1 = \left( \frac{\frac{H}{a}}{2,074 + 0,093 \frac{H}{a}} \right)^{0,754}$$

$$C2 = \left( \frac{\frac{H}{a}}{1,992 + 0,091 \frac{H}{a}} \right)^{0,683}$$

$$C3 = \left( \frac{\frac{H}{a}}{2,081 + 0,121 \frac{H}{a}} \right)^{0,672}$$

### iii) Matlab-script: Massebalancemodel

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Diskret model af infiltrationsfaskine
Af Maria Bergman 2008, redigeret af Marie R. Sagen 2010
Baseret på massebalancen  $dV/dt=Q_{ind}-Q_{over}-Q_{per}$ 
Der 'Qind' er flow ind i faskinen, 'Qper' er perkolationen ud af faskinen
og 'Qover' er eventuelt overløb ud af faskinen. Alle flows er i [m3/time]
da tidskridtet er på en time. Alle andre enheder er derfor også i meter og
per time.
%modelleret vandhøjde=z
%monitoreret vandhøjde=faskine
%monitoreret vandstand i G0.5=grund05
%monitoreret vandstand i G2.0=grund2
%monitoreret flow ind=flowIND
%monitoreret flow ved overløbet=flowUD
%monitoreret nedbør=nedboer
%Pejlinger af vandstande=pejl
% Kb og Ks er den mættede hydrauliske ledningsevne for henholdsvis bunden
og siderne
%
%inputs =tid,Kb,Ks,hstart, nedboer
%outputs= z, Qind, Qover, Qper
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all
clf

% Hænter data for enten april/maj eller Juni/Juli:

% % Hænter de justerede monitorerede data, April og Maj
% aprilmaj =xlsread('april_maj_time_data.xls', 4, 'A5:G1465');
% tid=[aprilmaj(:,1)'];
% faskine=[aprilmaj(:,2)'];
% grund05=[aprilmaj(:,3)'];
% grund2=[aprilmaj(:,4)'];
% flowIND=[aprilmaj(:,5)'];
% flowOVER=[aprilmaj(:,6)'];
% nedboer=[aprilmaj(:,7)'];
% % vanddybder 3 maj
% pejl=0.617;pejl2=-0.1185;pejl3=0.085;
% save EFH_data tid faskine grund05 grund2 flowIND flowOVER nedboer pejl
pejl2 pejl3
%

% % Hænter de justerede monitorerede data, Juni og Juli
Junijuli=xlsread('juni_juli_timedata.xls', 1, 'A2:G960');
tid=[Junijuli(:,1)'];
faskine=[Junijuli(:,2)'];
grund05=[Junijuli(:,3)'];
grund2=[Junijuli(:,4)'];
flowIND=[Junijuli(:,5)'];
flowOVER=[Junijuli(:,6)'];
nedboer=[Junijuli(:,7)'];
% vanddybde 8 juni
pejl=0.547;pejl2=-0.0635;pejl3=0.145;
```



```

save EFH_data tid faskine grund05 grund2 flowIND flowOVER nedboer pejl
pejl2 pejl3

load EFH_data

tid=tid+datenum('12-30-1899')-0.038;%for at få korrekt datoformat ...
% lægges en konverteringsdato til da excel og matlab starter datoene til
...
% forskellige tidspunkter. Der trækkes ca en time fra (=0.038) dag fra ...
% tidspunkterne fra excel, da disse er timestsummer og tidsværdien
% derfor er den sidste registerert den pågældende time altså kl lid i ...
% hel . For senere plotninger er det hensigtsmæssigt at dette registreres...
% som slutningen af timen inden, ikke som slutningen af timen.

%Konstanter:
c=0.91;
A=400;
l=8; %længde af faskine
b=0.8; %bredde af faskine
h=0.66; % højde af faskine og højde af faskineudløb, alle mål i meter;
n=0.95;

% Hydraulisk ledningsevne:
% K=3/10^8*3600; % fra måling i boring#2 kalibreret værdi til modellen
indenfor ...
% % usikkerhedsintervallet. multiplicerer med 3600 for at få m/time ikke
m/s
% Kb=K;
% Ks=K;

%evt hente ledningsevne bergenet ud i fra sænkningen af avndspejlet:
load hydr_ledn
p=p1
alpha=p(1);
beta=p(2);
Ks=(alpha/(2*(1+b)))*60*60
Kb=(beta/(1*b))*60*60

%Enheder justeres, alt i meter og på timesbasis:
flowIND=flowIND*5*60/10^3;flowOVER=flowOVER*5*60/10^3;% flow i m3/time
faskine=faskine/12/100;grund05=grund05/12/100;grund2=grund2/12/100;
%Niveauer i m, gennemsnit pr time

nedboer=nedboer/1000; %Nedbør i meter

% Startbesingelse
hstart=faskine(1)
% hstart=0.66 %justeret værdi til april og majdata da vandstanden her ...
% antages at være i faskinens topkote
V(1)=hstart*l*b*n;
Vmax=l*b*h*n;

% Formler
qInd=c*A*nedboer; %Afstrømningsmodel
%udsivning gennem alle sider
Qb=Kb*l*b; %perkolation gennem bunden
Qs=Ks*2*(1+b)/(1*b*n); %perkolation gennem siderne får h til at udgå da det
er denne vi vil finde.

```

```

tic
%Tidsskridt
for i=1:max(size(tid))
    if V(i)<=0      %Ingen perkolation eller flow ud når faskinen er tom
        Qper(i)=0;
        qOver(i)=0;
    elseif qInd(i)>(Qb+V(i)*Qs+(Vmax-V(i))); %Ved vandstand over 0.66 m =
flow ud
        Qper(i)=Qb+(V(i)*Qs);
        qOver(i)=qInd(i)- Qper(i)-(Vmax-V(i));
    elseif V(i)<(Qb+V(i)*Qs);%      %Perkoaltionen kan ikke overstige
genværende vandvolumen
        Qper(i)=V(i);
        qOver(i)=0;
    else
        Qper(i)=Qb+V(i)*Qs; %Ingen flow ind, og vandniv lavere end 0,66 =
kun infiltration
        qOver(i)=0;
    end
    % Beregner vandvolumen for næste tidsskridt:
    V(i+1)=V(i)+(qInd(i)- Qper(i)-qOver(i)); %tilsvareer formel 18 i
rapporten.

    end
end
toc

%Forbereder plottning
z=V./(l*b*n);
starttid=min(tid);
sluttid=max(tid);

vektor=ones(max(size(tid)),1);
fa_top=0.66*vektor; %definener faskinens topkote
fa_bund=0*vektor; %definener faskinens bundkote

%Plotter
subplot(4,1,1)
hold on;
plot(tid,qInd, 'k','LineWidth', 2)
subplot(3,1,1)
plot(tid,flowIND, 'r:','LineWidth', 2)
title('Flow indløb')
xlabel('Tid')
ylabel('Flow [m3/time]')
axis([starttid,sluttid, -0.5, 3])
set(gca,'XTickLabel',(starttid:0.3:sluttid));
datetick('x','dd/mm-yyyy','keeplimits','kepticks');
legend('Modelleret','Monitoreret');
hold off;

subplot(4,1,2)
hold on;
plot(tid,qOver, 'k','LineWidth', 2)
subplot(3,1,2)
plot(tid,flowOVER, 'r:','LineWidth', 2)
hold off;
title('Flow overløb')
xlabel('Tid')

```

```

ylabel('Flow [m3/time]')
axis([starttid,sluttid, -0.5, 3])
legend('Modelleret', 'Monitoreret');
set(gca,'XTickLabel',(starttid:0.3:sluttid));
datetick('x', 'dd/mm-yyyy', 'keplimits', 'kepticks' );

subplot(4,1,3)
hold on;
plot(tid,z(1:max(size(tid))), 'k','LineWidth', 2)
plot(tid,faskine, 'r','LineWidth', 2)
plot(tid,fa_top, 'b')
plot(datenum('8-jun-2010 18:15'), pejl, 'b*')
plot(datenum('3-may-2010 10:45'), pejl, 'b*')
plot(tid,fa_bund, 'b')
hold off;
xlabel('Tid')
ylabel('Kote [m]')
title('Vandniveauer')
axis([starttid,sluttid, -0.1,1.1])
set(gca,'XTickLabel',(starttid:0.3:sluttid));
datetick('x', 'dd/mm-yyyy', 'keplimits', 'kepticks' );
legend('Modelleret', 'Monitoreret', 'Faskinens top- og bundkote',
'Vanddybde fra pejling' );

subplot(4,1,4)
plot(f, 'DisplayName', 'f', 'YDataSource', 'f'); figure(gcf)
Ks=Ks/3600
Kb=Kb/3600

```

## iv) Pejling og nivellering

Maj:

tid pejling 3/5	tid DHI-data	fra DHI-data vanddybde [cm]	
tt:mm	(ca 10 min inden)		
10:54	10:45	63.53	faskine='fa'
13:16	13:05	92.98	grundvandsbrønd 0.5m='br_0,5'
15:00	14:50	120.34	grundvandsbrønd 2m='br_2'

Højde faskinebrønd top(fa) til faskinebund [cm] 198.7

### c.) nivellering

måling fra punkt	#1	#2	gennemsnit	forskel (02-01)
(alle mål fra toppen)	cm	cm		
fa		122.6	138.9	16.3
br0.5		93.6	109.8	16.2
br2		100.4	116.7	16.3
<i>højdeforskell brønde (2-0.5)</i>		6.80	6.90	0.10
<b>c_fa_0.5</b>		29	29.1	<b>29.05</b>
<b>c_fa_2</b>		22.2	22.2	<b>22.2</b>

### b.) pejling

ned til vand  
cm

<b>b_fa</b>	<b>137</b>
<b>b_0,5</b>	<b>181.5</b>
<b>b_2</b>	<b>168</b>

### udregning af 'a'

Href=kote , fra kote 0 i faskinebund Href= 198.7 cm

<b>a_fa = niveau 1</b>	<b>61.7</b>
<b>a_0.5 =niveau 2</b>	<b>-11.85</b>
<b>a_2 = niveau 3</b>	<b>8.5</b>

### Justeringsfaktor til data fra DHI

Niveau 1	-1.83
Niveau 2	-104.83
Niveau 3	-111.84

## Juni:

tid pejling 8/6	tid DHI-data	fra DHI-data vanddybde [cm]	
tt:mm	(ca 10 min inden)		
18:24	18:15	56.23	faskine='fa' grundvandsbrønd
18:28	18:20	98.84	0.5m='br_0,5'
18:28	18:20	133.33	grundvandsbrønd 2m='br_2'

Højde faskinebrønd top(fa) til faskinebund [cm] 198.7

c.) nivellering				
måling fra punkt	#1	#2	gennemsnit	forskel (02-01)
(alle mål fra toppen)	cm	cm		
fa		122.6	138.9	16.3
br0.5		93.6	109.8	16.2
br2		100.4	116.7	16.3
<i>højdeforskel brønde (2-0.5)</i>		<i>6.80</i>	<i>6.90</i>	<i>0.10</i>
<b>c_fa_0.5</b>		29	29.1	<b>29.05</b>
<b>c_fa_2</b>		22.2	22.2	<b>22.2</b>

b.) pejling	
	ned til vand cm
<b>b_fa</b>	<b>144</b>
<b>b_0,5</b>	<b>176</b>
<b>b_2</b>	<b>162</b>

udregning af 'a'	
Href=kote , fra kote 0 i faskinebund	Href= 198.7 cm
	cm
<b>a_fa = niveau 1</b>	<b>54.7</b>
<b>a_0.5 =niveau 2</b>	<b>-6.35</b>
<b>a_2 = niveau 3</b>	<b>14.5</b>

Justeringsfaktor til data fra DHI	
Niveau 1	-1.53
Niveau 2	-105.19
Niveau 3	-118.83

## Gennemsnit:

			gennemsnit (m betydende cifre og inkluderet målenøjagtighed)		forsk. %
	Maj	Juni	genemsnit	målenøjagtighed	
	cm	cm	cm	cm	
<b>fa</b>	-1.83	-1.53	<b>-1.68</b>	<b>-2.00</b>	0%
<b>br_0,5</b>	-104.83	-105.19	<b>-105.01</b>	<b>-105</b>	0%
<b>br_2</b>	-111.84	-118.83	<b>-115.335</b>	<b>-115</b>	-3%



### Boring #3

brønd dybde:		ca 30 cm				
H1		5 cm				
t	$\Delta t$	x	$\Delta x$	$\Delta x/\Delta t$	R	
min	min	cm	cm	cm/min	cm/s	
		3,91				
1,00	1	58,60	54,69	54,69		
2,00	1	58,6	0,00	0,00		
4,00	2	58,65	0,05	0,02		
6,00	2	59,20	0,55	0,28		
8,00	2	59,25	0,05	0,02		
10,00	2	59,30	0,05	0,02		
12,00	2	59,35	0,05	0,03		
14,00	2	59,45	0,10	0,05		
18,00	4	59,60	0,15	0,04		
22,00	4	59,65	0,05	0,01		
32,00	10	59,65	0,00	0,00		

## vi) Vedrørende faskinens dimensioner

Faskineelementerne er l x h x b = 0.8x0.8x0.66 meter store, se evt figur 1 med mål fra producenten nedenfor (kilde: appendiks xii).

**RIGO-fill regnvandsblokke**  
800x800x660mm  
np-nr. 262728-100



### Data:

Data-angivelse pr. helblok

Dimension: (L x B x H)	800 x 800 x 660 mm
Materiale:	PP
Vægt:	20 kg
Opstuvningskapacitet:	95 %
Opsamlingskapacitet:	401 liter
Tilslutning på Endegitter:	Ø110, 160, 200mm

Adgang for vedligehold:



Figur 1, billeder af rigo-fill regnvandsblokke, fra Nyrup plast

I dokumentet: "Oplysninger om dimensionering for faskine 2 og 3 i forbindelse med Energy Flex House på Teknologisk Institut" (se appendiks i) står der:

"...Elementerne har hver dimensionerne l x b x h = 800 x 800 x 665 mm. ...

...Faskinen opbygges derfor af i alt 10 Rigo-fill elementer, der placeres i én lang række (1 i bredden, 1 i højden), så udsivningsarealet bliver størst muligt.

Beregnet volumen: 4,26 m<sup>3</sup>

Længde: 6,65 m

Bredde: 0,8 m

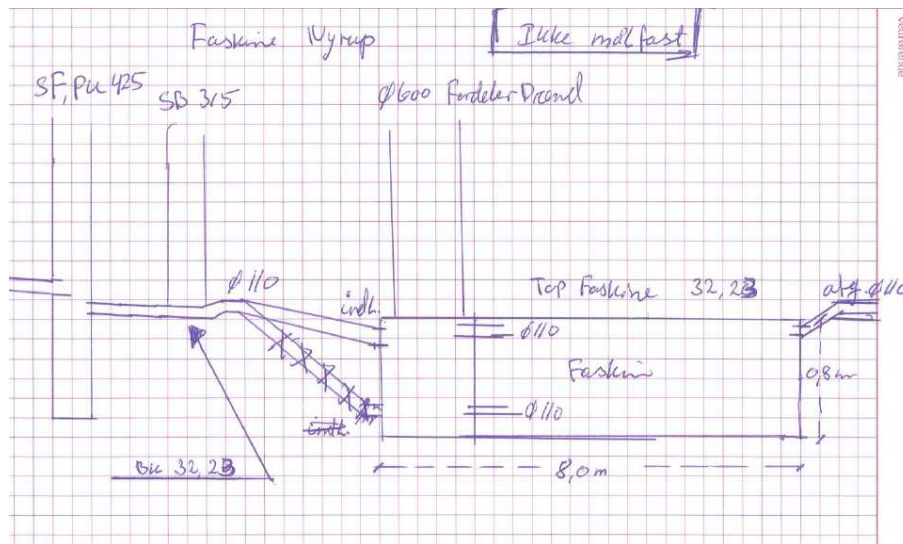
Højde: 0,8 m

"

—



**Overstående citat tyder på at elementerne er sat på højkant**, noget som ifølge producenten er muligt, men det anbefales ikke. Men tegningen over faskinen (se figur 2) viser at længden af faskinen er 8 meter ikke 6,6, dvs elementerne ikke er sat på højkant. Tegningen siger også, mystisk nok, at højden af faskinen er 0,8 meter.



**Figur 2, skitse af faskinen, fra entreprenøren**

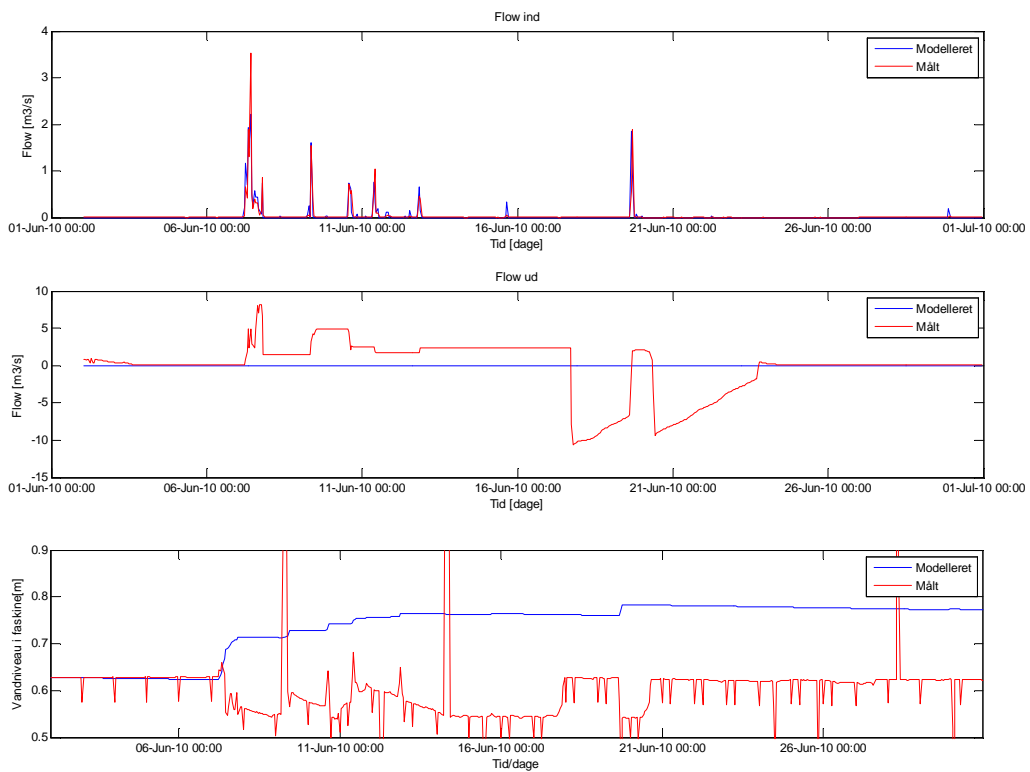
På alle fotografierne fra TI ligner det faskineelementerne er sat samme vej som billedene af faskineelementerne fra nyrup plast. Dette tyder meget stærk på at elementerne ikke er sat på højkant. Hvis elementerne ikke er sat på højkant er længden af faskinen 8 meter og højden 0,6 meter (Der antages fortsat at faskinen består af 10 elementer da dette både er beskrevet i det ovenstående citat og kan 'tælles' ud i fra TIs fotografier (se evt figur 14 i rapporten)).

Afstanden fra jordoverfladen ned til faskinens bund fra fordelerbrønden er målt til ca 2 m. Afstanden fra jordoverfladen ned til faskinen er målt til ca 1,4 meter. Dette tyder dette meget stærkt på at højden af faskinen er 0,6 meter.

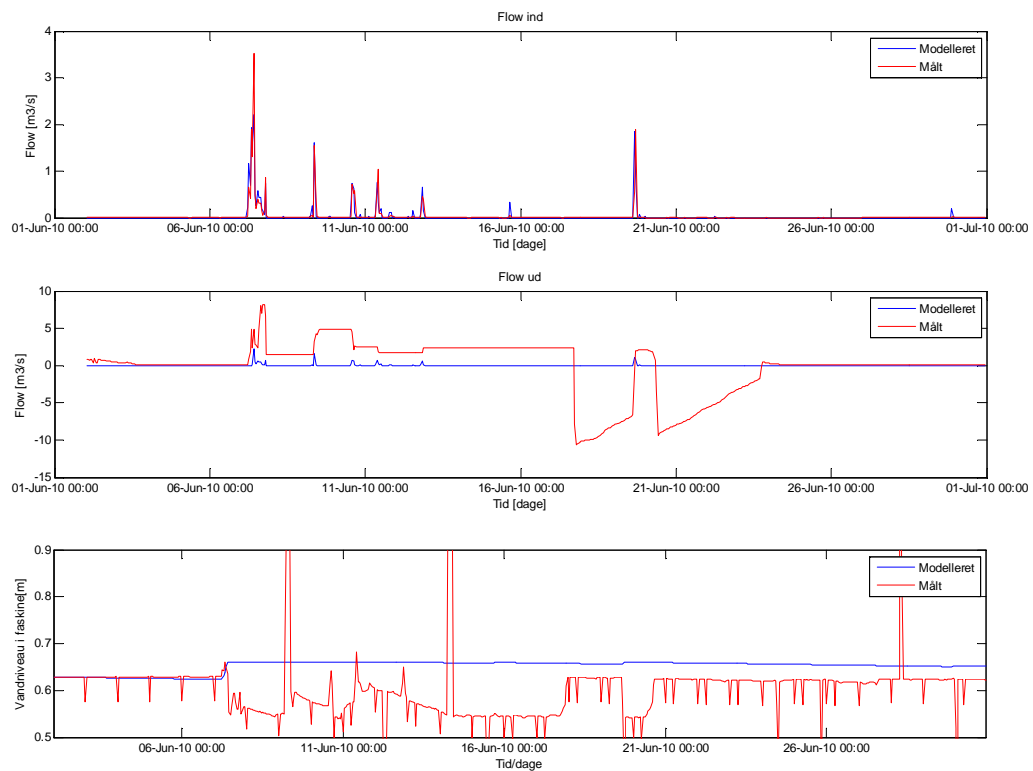
Endnu et tegn på at faskinen har målene 0,66m x 0,8m x 8m ses i de to sidste figurer. Figur 3 og 4 viser et plot af resultatet af massebalancemodellen i mod de justerede online monitorerede data. Modellen og de målte data svarer knapt så godt til hinanden når højden er 0,8m (figur 3). Det er registreret flow ud og vandstanden falder selvom modellen ikke viser dette. Modellen og de målte data passer til gengæld meget godt overens for en faskinehøjde på 0,66m (figur 4) (dette er en tidlig modellering med  $K=9,4 \cdot 10^{-8}$ ).

Detaljer rundt en overløbshændelse den 26. februar, der flowmåleren ved overløbet fungerer, viser også at overløbet sker omtrent ved højden 0,65m. Der er inden hændelsen intet flow ved overløbet, og på et minut går flowet op til 0,2l/s. Data fra 30. april viser også at overløb sker omtrent ved vandstanden 0,65m.

Der virker derfor til at der er sket en ombytning på et tidspunkt med faskinens mål. Det virker næsten helt sikkert at faskinen er **0,66 meter høj, 0,8 meter bred og 8 meter lang**. Teknologisk institut v. Ulrik Hindsberger siegr sig enige og er 99 % sikre på at dette er faskinens mål. Den eneste måde at blive mere sikker på er at der eventuelt graves ned til faskinen.



Figur 3. Plot der viser resultaterne for modellen af faskinen med mål  $l \times h \times b = 6.6 \times 0.8 \times 0.8$  meter.



Figur 4. Plot der viser resultaterne for modellen af faskinen med mål  $l \times h \times b = 8 \times 0.66 \times 0.8$  meter.

## vii) Hydrauliske gradienter

Til figur 31

	rådata			justerede data			Hydrauliske gradienter		
	faskine [cm]	G0.5 [cm]	G2.0 [cm]	abs.Faskine [cm]	abs.G0.5 [cm]	Abs. G2.0 [cm]	Faskine til G05	Faskine til G2	G05 til G2
11. december 2009	58,84	99,56	109,3	56,84	-5,44	-5,7	<b>1,38</b>	<b>0,35</b>	0,00
23. december 2009	56,85	90,67	97,74	54,85	-14,33	-17,26	<b>1,54</b>	<b>0,40</b>	0,02
15. januar 2010	63,92	90,78	95,65	61,92	-14,22	-19,35	<b>1,69</b>	<b>0,45</b>	0,04
22. januar 2010	63,99	89,41	94,11	61,99	-15,59	-20,89	<b>1,72</b>	<b>0,46</b>	0,04
31. januar 2010	60,65	86,06	90,61	58,65	-18,94	-24,39	<b>1,72</b>	<b>0,46</b>	0,04
12. februar 2010	53,2	78,25	82,82	51,2	-26,75	-32,18	<b>1,73</b>	<b>0,46</b>	0,04
20. februar 2010	64,26	88,01	91,99	62,26	-16,99	-23,01	<b>1,76</b>	<b>0,47</b>	0,04
28. februar 2010	102,3	153,25	152,15	100,3	48,25	37,15	<b>1,16</b>	<b>0,35</b>	0,08
3. marts 2010	100,36	130,15	136,7	98,36	25,15	21,7	<b>1,63</b>	<b>0,43</b>	0,03
10. marts 2010	81,85	110,09	115,43	79,85	5,09	0,43	<b>1,66</b>	<b>0,44</b>	0,03
15. marts 2010	85,27	117,45	124,31	83,27	12,45	9,31	<b>1,57</b>	<b>0,41</b>	0,02
20. marts 2010	90,85	121,12	129,7	88,85	16,12	14,7	<b>1,62</b>	<b>0,41</b>	0,01
1. april 2010	79,33	115,7	120,74	77,33	10,7	5,74	<b>1,48</b>	<b>0,40</b>	0,04
12. april 2010	71,85	105,17	111,07	69,85	0,17	-3,93	<b>1,55</b>	<b>0,41</b>	0,03
16. april 2010	62,08	95,61	101,56	60,08	-9,39	-13,44	<b>1,54</b>	<b>0,41</b>	0,03
20. april 2010	55,2	88,73	112,37	53,2	-16,27	-2,63	<b>1,54</b>	<b>0,31</b>	-0,10
2. maj 2010	63,65	92,79	120,48	61,65	-12,21	5,48	<b>1,64</b>	<b>0,31</b>	-0,13
6. maj 2010	64,74	91,9	120,2	62,74	-13,1	5,2	<b>1,69</b>	<b>0,32</b>	-0,14
21. maj 2010	56,48	90,81	122,05	54,48	-14,19	7,05	<b>1,53</b>	<b>0,26</b>	-0,16
25. maj 2010	45,03	95,33	125,6	43,03	-9,67	10,6	<b>1,17</b>	<b>0,18</b>	-0,15
7. juni 2010	57,94	103,26	140,69	55,94	-1,74	25,69	<b>1,28</b>	<b>0,17</b>	-0,20
10. juni 2010	58,53	99,25	131,7	56,53	-5,75	16,7	<b>1,38</b>	<b>0,22</b>	-0,17
15. juni 2010	56,04	95,28	126,89	54,04	-9,72	11,89	<b>1,42</b>	<b>0,23</b>	-0,16
<b>gennemsnit</b>							<b>1,54</b>	<b>0,36</b>	<b>-0,03</b>

Til figur 32:

	Rådata			Justerede data		
	faskine [cm]	G0.5 [cm]	G2.0 [cm]	abs.Faskine [cm]	abs.G0.5 [cm]	Abs. G2.0 [cm]
Afstand fra faskine [cm]	0	45	180			
11. december 2009	58,84	99,56	109,3	<b>56,84</b>	<b>-5,44</b>	<b>-5,7</b>
15. januar 2010	63,92	90,78	95,65	<b>61,92</b>	<b>-14,22</b>	<b>-19,35</b>
12. februar 2010	53,2	78,25	82,82	<b>51,2</b>	<b>-26,75</b>	<b>-32,18</b>
15. marts 2010	85,27	117,45	124,31	<b>83,27</b>	<b>12,45</b>	<b>9,31</b>
16. april 2010	62,08	95,61	101,56	<b>60,08</b>	<b>-9,39</b>	<b>-13,44</b>
21. maj 2010	56,48	90,81	122,05	<b>54,48</b>	<b>-14,19</b>	<b>7,05</b>
15. juni 2010	56,04	95,28	126,89	<b>54,04</b>	<b>-9,72</b>	<b>11,89</b>

## viii) Vandvolumener fra faskine

### ks1

#### Vandvolumner

måned	ΣQover [m3]	ΣQper [m3]	ΣQin[m3]	ΔV	
april og maj	29,806	2,807	32,578	-0,035	
juni og juli	20,184	1,799	22,168	0,186	
<b>sum</b>	<b>49,989</b>	<b>4,606</b>	<b>54,746</b>		
procent ud hvor?	92%	8%			54,595
<b>m3 om året fra faskine</b>	<b>204,3</b>	<b>18,8</b>			
m3 om måneden	17,026	1,569			
		1568,708 l/måned			
		51,433 l/dag			
		2,143 l/time			

#### Gentagelsesperiode

	dage	år	antal overløb i perioden	antal overløb pr år	T
juni		29			
juli		11			
april		30			
maj		31			
<b>totalt</b>		<b>101</b>	<b>0,277</b>	<b>37,000</b>	<b>133,713</b>
					<b>0,007</b>



massebalance tjek for ks1				
Højdeforskel		hstart fra modell	h slut	h slut fra model
	-0,006		0,660	0,654
	0,031		0,628	0,659

<i>nedbør i området</i>	<i>Nedbør fra EFH</i>
<i>m</i>	<i>(Q=C i A)</i>
	<i>m3</i>
0,613	223,132

## ks2

### Vandvolumner

måned	ΣQover [m3]	ΣQper [m3]	ΣQin[m3]	
april og maj	20,990	11,927		32,578
juni og juli	16,423	5,664		22,168
<b>sum</b>	<b>37,413</b>	<b>17,591</b>		<b>54,746</b>
procent ud hvor?	68 %	32 %		55,0038
<b>m3 om året fra faskine</b>	<b>151,771</b>	<b>71,361</b>		
m3 om måneden	12,648	5,947		
		5946,767	l/måneden	
		194,976	l/dag	
		8,124	l/time	

### Gentagelsesperiode

	dage	år	antal overløb i perioden	antal overløb pr år	T	
juni		29				
juli		11				
april		30				
maj		31				
<b>total</b>		<b>101</b>	<b>0,277</b>	<b>17,000</b>	<b>61,436</b>	<b>0,016</b>

## ix) Regnhave

zoner	lille stadie	mellemstadie	fyldtstadie	ekstrem
	1	1+2	1+2,5	1+2+3
A [m2]	30.00	130.00	216.42	216.42
volumen [m3]	9.00	24.00	194.78	291.58
volumen pr faskine [m3]	<b>3.00</b>	<b>8.00</b>	<b>64.93</b>	97.19
volumen nedsivning		15.00	185.78	282.58
areale nedsivning	30.00	100.00	186.42	186.42
K	1.00E-08	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
m3/s (K*A)	3.00E-07	1.00E-04	1.86E-04	1.86E-04
tømmningstid [dage]	<b>347.222</b>	<b>1.736</b>	<b>11.534</b>	<b>17.544</b>
tømmningstid [år]	<b>0.951</b>	<b>0.005</b>	<b>0.032</b>	<b>0.048</b>
	<b>ca 1 år</b>	<b>2 dage</b>	<b>12 dage</b>	<b>3dage</b>
procent af ekstremvolumen	3%	8%	67%	100%

oplyste areal for regnhave	
indre cirkel [m2]	30
ytte ring [m2]	100

hele regnhavens radius, koter, og areale af vand i tærren er skønnet ud i fra tegning af regnhaven (19k, å.u.)

da der er opgivet en lav ledningseven i zone 1 og en der fremmer nedsivning i zone 2 og 3 er K for zone 1 skønnet til  $10^{-8}$  og K for zone 2 og 3 skønnet til  $10^{-6}$ .

ved ekstremstadie er areale af ekstra vand 2,2\*2,2 cm på tegningen 2 cm skønnes til 200 cm i virkeligheden vanddybden skønnes til 0,1 meter dette giver et volumen på [m3]: 96,8.



## x) Matlab-script: CDS-regn og overløb

```
clc
clear all
close all
clf

% Hænter CDS-regndata
Dregn=xlsread('designregnCDS.xlsx', 1, 'A2:B482');
tid=[Dregn(:,1)'];
CDS_regn=[Dregn(:,2)'];

CDS_regn=CDS_regn/10^6*60*400*0.91; % Får nedbør fra mikrometer til meter,
og til fra sekund til per minut. Multiplicerer så med
afstrømningskoefficient og oplandsarealet

Vmax=0.66*0.8*8*0.95; %Finder maksimumsvolumnet til faskinen

Qf=((3/10^8*60)*2*(8+0.8)*0.33)+((3/10^8*60)*8*0.8);
V=cumtrapz(CDS_regn)-Qf
%
loesning=Vmax-V(222)%der gættes på volumner indtil 'løsning'=negativ
Vtotal=V(end)%Totalvolumnet findes
V_overloeb=V(end)-Vmax %Overløbsvolumnet findes

vektor=ones(max(size(tid)),1);
CDS_regn2=CDS_regn;
Qf=Qf*vektor;
Perk=sum(Qf)% den totale perkolationen findes

%Plotter:
ant=max(size(CDS_regn))-222;
CDS_regn(end-ant:end) = [0];
hold on;
area(tid,CDS_regn2, 'FaceColor', 'b','EdgeColor', 'b');
area(tid,CDS_regn,'FaceColor', 'g', 'EdgeColor', 'g');
area(tid, Qf, 'FaceColor', 'r', 'EdgeColor', 'r');
hold off
xlim([0 480])
xlabel('minutter')
ylabel('[m3/min]')
legend('Overløbsvolumen', 'Faskinevolumen', 'Nedsivningsvolumen');
```

## xi) Nedsivningskort

### Københavns Kommune LAR-Projekthåndbog

#### INDHOLD

Afgrænsning af områder for nedsivning af regnvand	1
Ad 1. Områder med særlige drikkevandsinteresser og ad 2. 300 meter beskyttelsesområder	2
Ad 3. 25 meter zoner omkring vandløb og søer	2
Ad 4. Jordarter	2
Ad 5. Afstand til grundvandsspejlet	3
Ad 6. Samlet lertykkelse og sårbare områder	4
Ad 7. Jordforurening	4
Ad 8. Separatkloakerede områder i København	5
Konklusivt kort	5
Referencer	6

### Afgrænsning af områder for nedsivning af regnvand

Afgrænsningen af områder for nedsivning af regnvand i Københavns Kommune tager udgangspunkt i følgende forhold:

1. Områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD områder)
2. 300 meters beskyttelsesområder omkring vandindvindingsboringer
3. 25 meter fra recipienter (vandløb og søer)
4. Jordarternes hydrauliske egenskaber

5. Afstanden til grundvandsspejlet
6. Lertykkelse og grundvandets sårbarhed overfor forurening
7. Jordforurening, V1 eller V2 kortlagte grunde
8. Separatkloakerede områder i København

### Ad 1. Områder med særlige drikkevandsinteresser og ad 2. 300 meter beskyttelsesområder

Områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD områder) er vist i bilag 1 sammen med 300 meters beskyttelseszoner om drikkevandsboringer. Der findes 2 OSD områder i Københavns Kommune; et område omkring Frederiksberg Kommunes drikkevandsboringer beliggende omkring disse som strækker sig nordvest og sydøst for Frederiksberg Kommune ind i Københavns Kommune, og et område i den nordøstlige del af Københavns Kommune. OSD områderne i Københavns Kommune udgør en mindre del af kommunen.

Der kan ikke tillades nedsivning i OSD-områder.

### Ad 3. 25 meter zoner omkring vandløb og søer

Indenfor 25 meter omkring vandløb og søer kan der ikke nedsives vand, men der skal søges om en udledningstilladelse. Bilag 2 viser disse zoner for vandløb og søer. I Københavns Kommune er der således angivet 25 meters zoner om følgende vandløb: Harrestrup Å, Damhus Å, Fæstningskanalen, Nordkanalen, Søborghusrenden, Gøtøfte Renden, Lygte Å, Grøndals Å, Ladegårds Å, Nordre Landkanal, Bydelskanalen, Pumpekanal 1 og 3, Hovedkanal City, Universitetets Kanal, Vandelementer i Ørestaden, Mellemgrøften og Hovedgrøften.

Og søer: Utterslev Mose, Emdrup Sø, Damhussøen, De Indre Søer, Stadsgraven omkring Christians Havn og Vandelementer i Ørestaden.

### Ad 4. Jordarter

Jordarterne er vurderet med hensyn til deres egnethed for nedsivning af vand. Tabel 1 viser vurderingen af jordarterne i Københavns Kommune, sammen med andelen af arealet i forhold til totalarealet i kommunen.

Tabel 1: Jordarterne i København.

Jordart	Egnethed til nedsvivning	% areal i kommunen
Postglacial ferskvandsler (FL)	Ikke	0,2
Postglacial ferskvandsgytje (FP)	Ikke	0,1
Postglacial ferskvandstørv (FT)	Ikke	5,9
Postglacial saltvandsgrus (HG)	Vel	3,5
Postglacial saltvandssand (HS)	Vel	6,0
Postglacial saltvandsler (HL)	Ikke	2,3
Glacial smeltevandsgrus (DG)	Vel	0,2
Glacial smeltevandssand (DS)	Vel	0,6
Glacial moræneler (ML)	Måske	73,3
By	Ikke	6,0
Sø	Ikke	1,0
Ukendt (X)	Måske	0,9

Bilag 3A viser jordarterne i Københavns Kommune, der er mest moræneler i kommunen svarende til næsten ¾ dele. Udbredelsen af ferskvandstørv som ikke er egnet for nedsvivning af vand findes hovedsageligt omkring de ferske recipienter vandløb og søer. Bilag 3B viser på baggrund af vurderingen i tabel 1, hvilke områder der er egnede, måske egnede og ikke egnede for nedsvivning af vand rent hydraulisk. I godt 10% af Københavns Kommune er området egnet for nedsvivning i forhold til jordarten.

#### Ad 5. Afstand til grundvandsspejlet

Der skal være minimum 3 meter fra terræn til grundvandsspejlet for at området er egnet for nedsvivning af vand. Bilag 4A viser områder hvor der er mere end 3 meter fra terræn til grundvandsspejlet (grønne) og områder hvor der er mindre end 3 meter fra terræn til grundvandsspejlet (røde). Dette er hovedsageligt områder langs de ferske recipienter og mod havnen, samt på Amager der har mindre end 3 meter fra terræn til grundvandsspejlet. Bilag 4B viser områder, inden for områder hvor der er mindre end 3 meter fra terræn til

grundvandsspejlet, hvor grundvandspotentialet står over terræn. I disse områder er det ikke egnet at nedsive. De findes omkring Lersøpark-området langs Lygte Å og på Vestamager.

Grundvandspotentialet er fastlagt i forbindelse med udarbejdelse af et potentialekort for kalkmagasinet for Region Hovedstaden, oktober 2008 /1/. Der kan findes sekundære grundvandsmagasiner som ligger over grundvandspotentialet for kalkmagasinet som ikke kendes og derfor ikke er medtaget i denne undersøgelse af afstand til grundvandsspejlet fra terræn.

#### Ad 6. Samlet lertykkelse og sårbare områder

Tilstedeværelsen af ler over grundvandsmagasinet betyder at nedsvivningen går langsomt med god mulighed for at omsætte eventuelle forurenende stoffer i det nedsvivende vand. Den langsomme nedsvivning betyder også, at regnvandet i nogle tilfælde nedsiver så langsomt, at vandet opstuvet på jordoverfladen. Således er Københavns Kommune afgrænset i sårbare områder med lille, mellem og stor sårbarhed. Bilag 5A viser afgrænsningen af områder med lertykkelse på under 3 meter, mellem 3 og 5 meter, mellem 5 og 10 meter og derefter med 10 meters ækvidistance. Bilag 5B viser på baggrund af denne afgrænsning de sårbare områder som beskrevet tidligere. Områder med stor sårbarhed har under 5 meter ler, områder med mellem sårbarhed har mellem 5 og 10 meter ler og områder med lille sårbarhed har over 10 meter ler.

I den centrale del af Københavns Kommune er der hovedsageligt stor sårbarhed, mens der i den nordlige del af kommunen hovedsageligt findes områder med lille sårbarhed.

#### Ad 7. Jordforurening

Bilag 6 viser de kortlagte grunde i Københavns Kommune. De rødt skraverede områder viser kortlagte grunde på vidensniveau 2 (V2) mens de blå skraverede områder viser kortlagte grunde på vidensniveau 1 (V1). Der findes på nuværende tidspunkt en del V1 og V2 kortlagte områder i den centrale del af Københavns Kommune samt i området omkring Lersøparken og Nordhavnen.

Status på kortlægningen ændres i takt med at kortlægningen udføres og eventuelt afværges eller renses op. Derfor bør der indhentes aktuelle oplysninger om jordforurening forud for vurdering af nedsvivning i et potentielt område. Stillingtagen til forurenede grunde sker i forbindelse med den tekniske gennemgang.

## Ad 8. Separatkloakerede områder i København

Bilag 7 viser de separatkloakerede områder i København sammen med de fælleskloakerede områder og landzoner. Nedsivning ønskes ikke i de separatkloakerede områder som derfor betegnes som ikke egnede for nedsivning.

## Konklusivt kort

Egnetheden til nedsivning defineres i tre kategorier, ikke egnet, måske egnet og egnet:

- **Ikke egnet** er områder hvor jordarten er: FL+FP+FT+HL+BY+SØ, områder hvor grundvandsspejlet står over terræn, områder indenfor 300 meter beskyttelseszonerne, hvor der er mindre end 10 meter ler, områder hvor jorden eller grundvandet er forurenet, og alle områder inden for 25 meter omkring vandløb og søer samt alle separatkloakerede områder i København.
- **Måske egnet** er områder hvor grundvandsspejlet er mellem under 3 meter fra terræn eller hvor jordarterne er ler (ML) eller ukendte (X). Hvis jorden er under mistanke for, at være forurenet, kan det være nødvendigt at tage jordprøver for, at fastlægge forureningsgraden. Desuden er der også inddraget de områder indenfor 300 m beskyttelseszonerne, hvor der er mere end 10 meter ler.
- **Egnet** er områder hvor der er sand og grus aflejringer sammenfaldende med at grundvandsspejlet er mere end 3 meter under terræn, hvor jorden ikke er forurenet. Det er ligeledes uden for 300 meter beskyttelseszonerne og uden for 25 meter zonerne omkring vandløb og søer.

I forbindelse med ansøgning om nedsivningstilladelser laver Center for Miljø altid en konkret vurdering af de miljømæssige risici, som er forbundet med nedsivningen. Vurderingen foretages eventuelt på ansøgningsmaterialet.

Tablet 2 viser områdernes kategorisering og bilag 8 viser afgrænsningen af områderne.

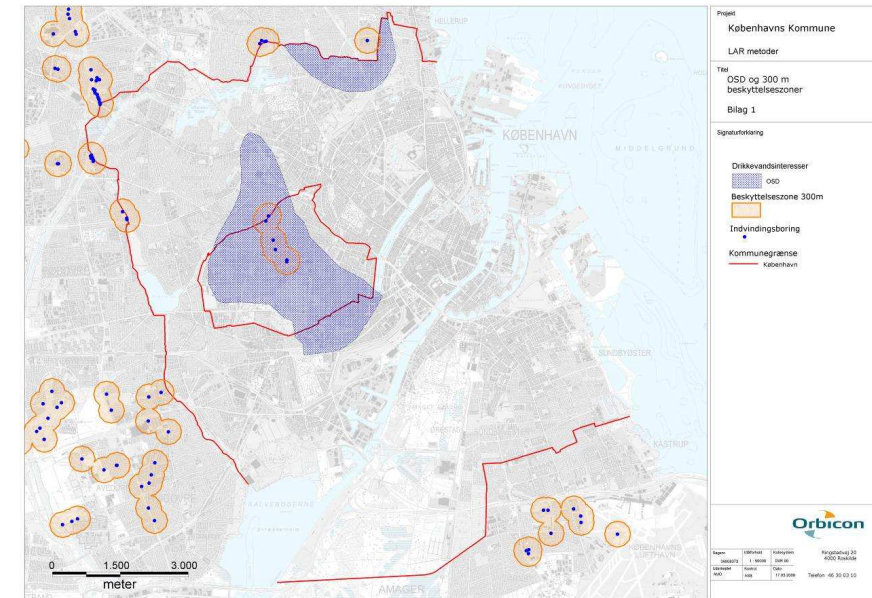
Tablet 2: Kategorisering af områdernes egnethed til nedsivning.

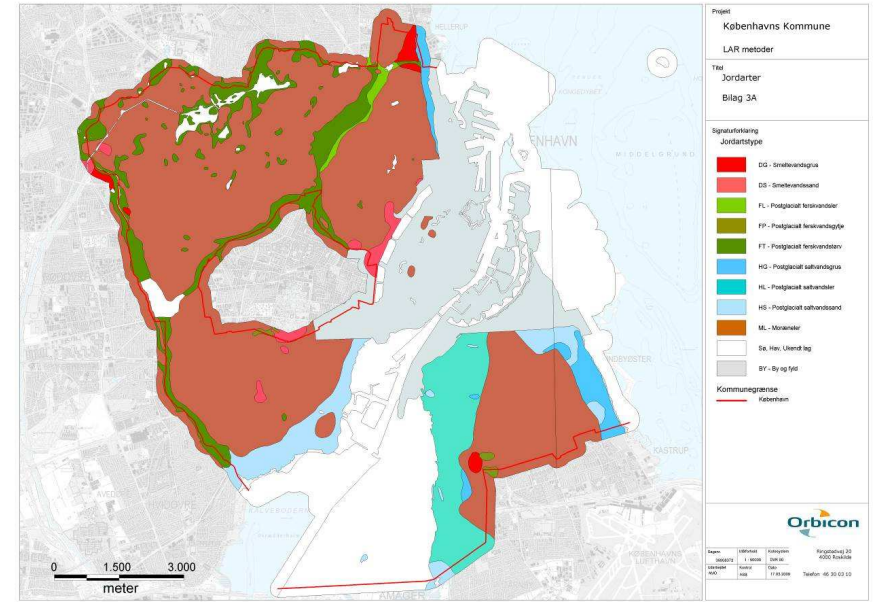
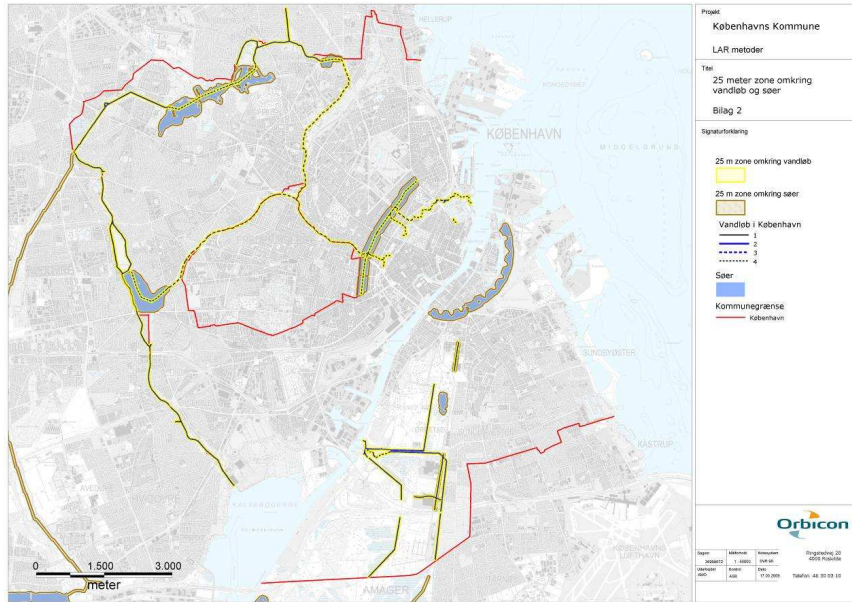
Bedømmelse	300 meter beskyttelseszoner	25 meter zone vandløb og søer	Afstand til grundvandspejl	Jordarter
Ikke egnet	Inden for dette, hvis der er mindre end 10 meter ler	Inden for dette	Over terræn	FL+FP+FT+HL+BY+SØ
Måske egnet	Hvor der er mere end 10 meter ler	Udenfor disse områder	Mindre end 3 meter under terræn	Møræneler og ukendte områder

Egnet	Uden for disse områder	Udenfor disse områder	Mere end 3 meter under terræn	Sand og grus-aflejringer
-------	------------------------	-----------------------	-------------------------------	--------------------------

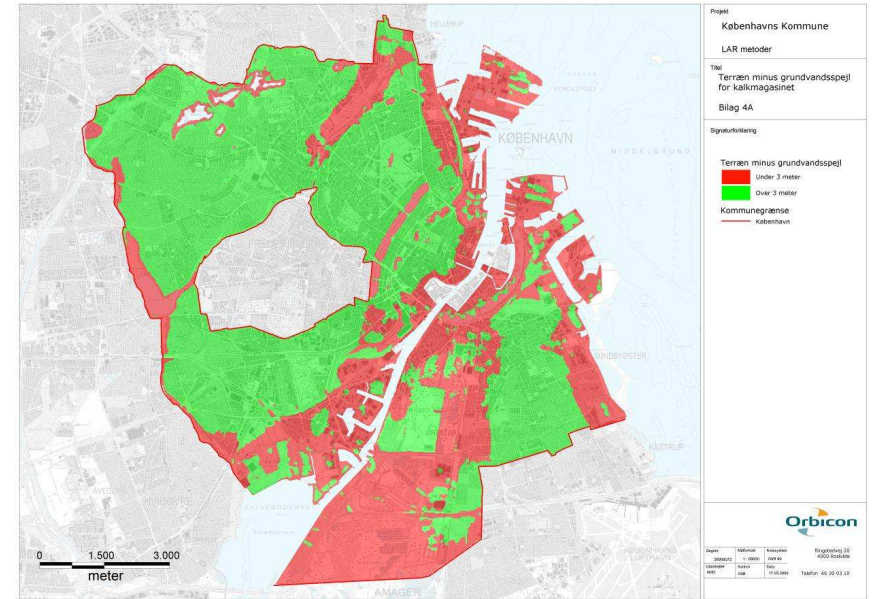
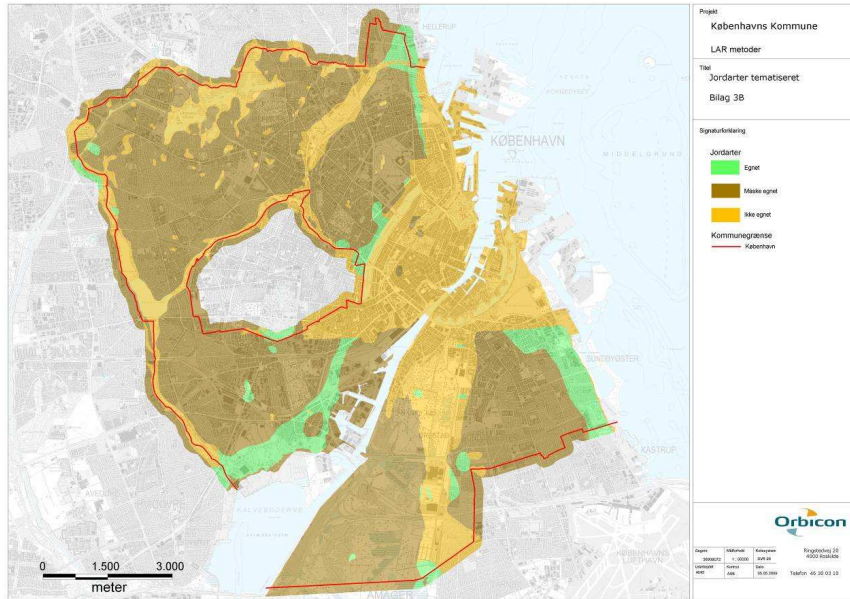
## Referencer

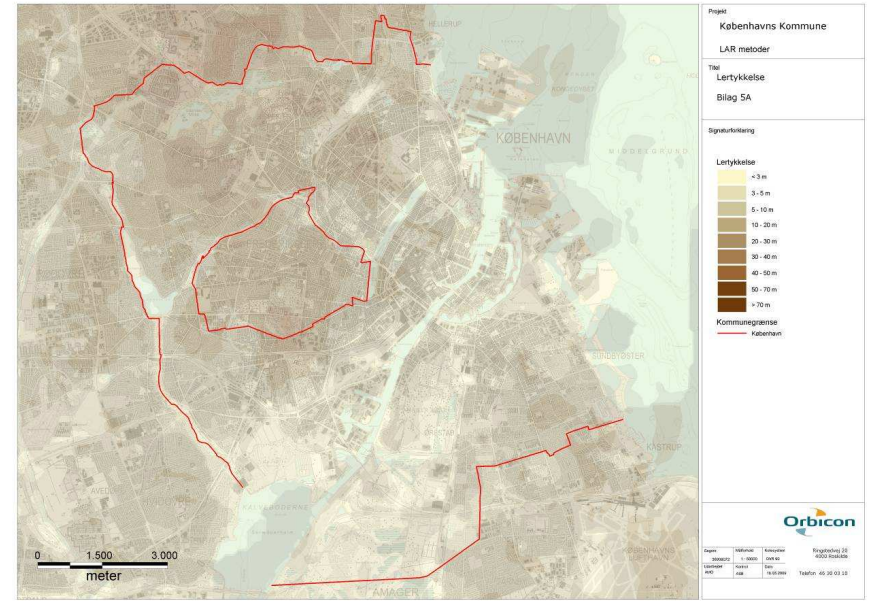
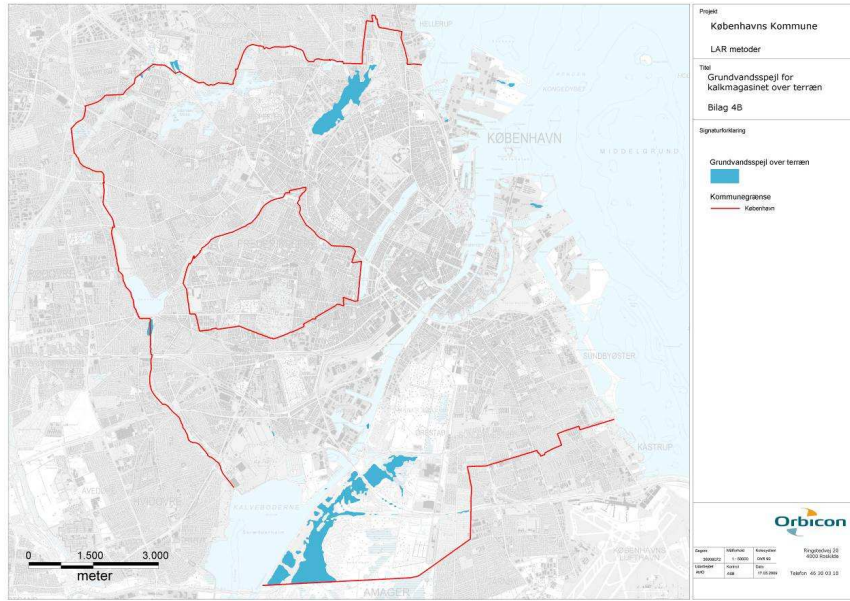
- 1 Potentialekort for kalkmagasinet i Region Hovedstaden, oktober 2008. Orbicon A/S for Region Hovedstaden.

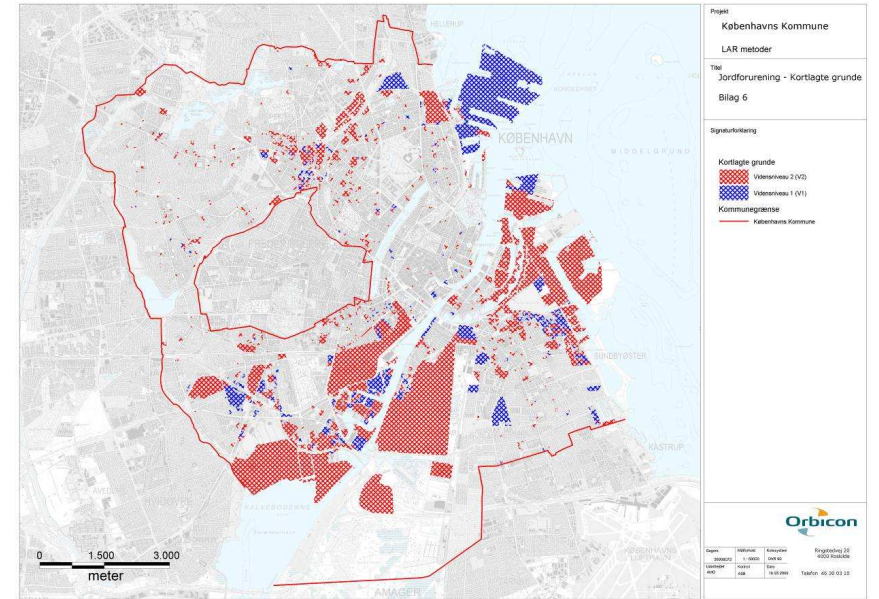
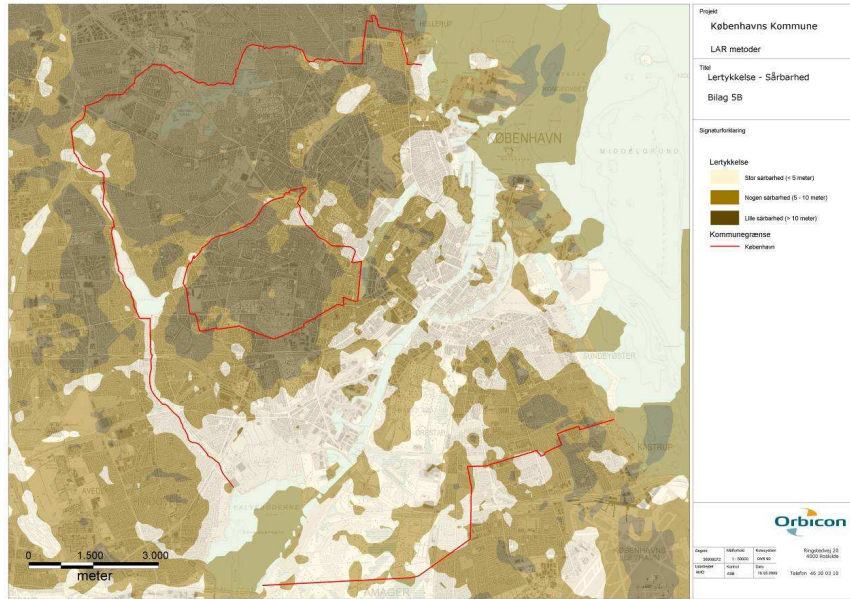




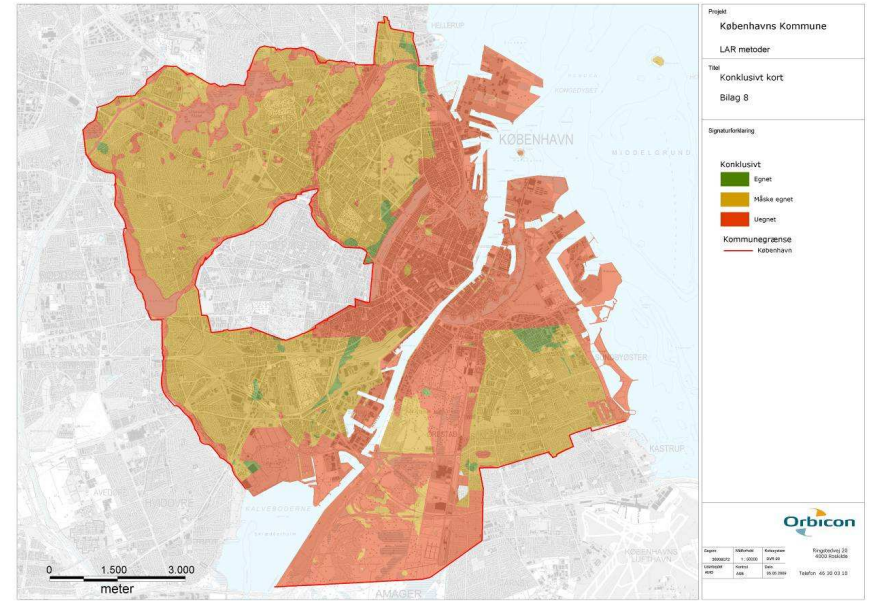
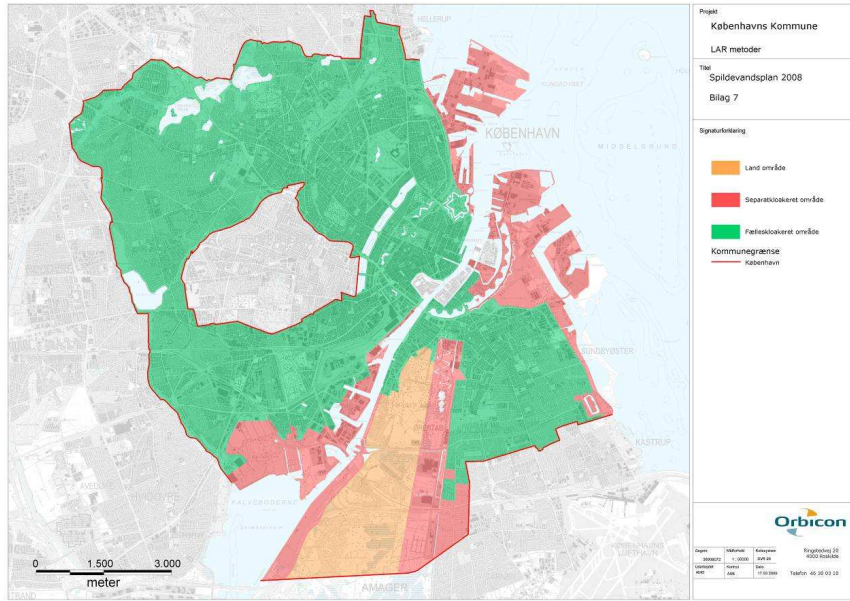










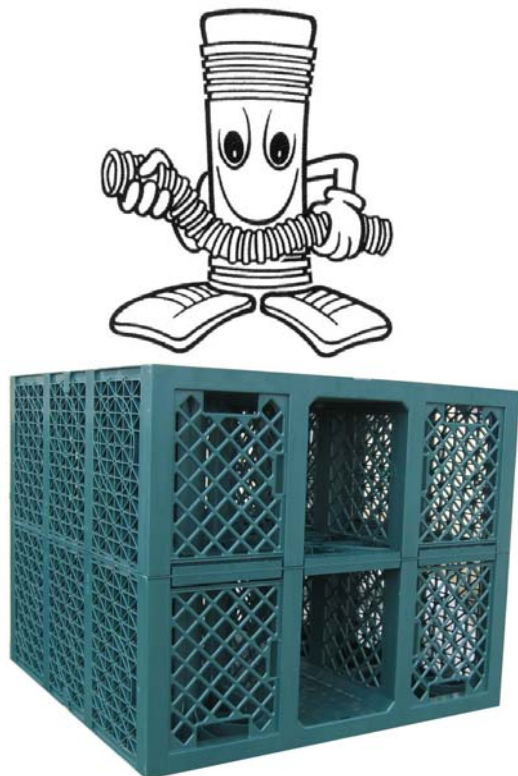


## **xii) Installationsvejledning RIGO-Fill**

Se brochure på de følgende sider

# RIGO-fill regnvandblokke

Til brug for håndtering af regnvand



## Installationsvejledning

For at sikre korrekt dimensionering og montering af Deres faskine, følg anvisningerne i denne vejledning.

### Anvendelse:

**RIGO-fill regnvandsblokke** fra **nyrup plast** er et produkt, som kan anvendes til nedsivning og forsinkelse af regnvand.

**RIGO-fill regnvandsblokke** er konstrueret således, at der opbygges et firkantet rørsystem i en eller flere etager ved sammensætning af blokkene, og såfremt nedsivning ikke ønskes, kan **RIGO-fill regnvandsblokke** omslutes af en tæt membran.

Blokkene kan TV-inspiceres og spules, såfremt der etableres et brøndsistem (se skitse på bagsiden!).

**RIGO-fill regnvandsblokke** kan anvendes under veje med tung trafik samt i ikke trafikerede områder.

### Afstandskrav:

Drikkevandsboringer:	25 meter
Vandløb, søer og havet:	25 meter
Beboelse:	5 meter <sup>(x)</sup>
Hus uden beboelse /uden kælder:	2 meter <sup>(x)</sup>
Skel:	2 meter <sup>(x)</sup>

<sup>x)</sup> Vejledende afstandskrav

### Dimensionering:

Foretages på baggrund af en nedsivningstest. Alternativt kan nedenstående tabel benyttes:

Jordtype (infiltrationshastighed)	Tagareal (vandret plan)
Sand (0,001 m/s)	84 m <sup>2</sup> / regnvandsblok
Silt (0,00001 m/s)	12,7 m <sup>2</sup> / regnvandsblok
Lerholdige jordtyper	Kontakt <b>nyrup plast</b>

Værdierne er fastsat på baggrund af rørcenter-vejledning 009, kapitel 5.2 Beregningsniveau 1: små anlæg (max 150 m<sup>2</sup> overfladeareal). Overbelastningshyppighed T=2 år.

Ved dimensionering af RIGO-fill regnvandsblokke til store faskiner og forsinkelsesforanstaltninger – kontakt venligst **nyrup plast**.

**Nedsivning:**

Faskinen skal omslutes af en ikke vævet geotekstil med en vandgennemtrængelighed på mindst 20.000 l pr m<sup>2</sup> pr døgn ved et vandtryk på 100 mm vandsøjle. Følgende typer overholder disse krav:

Placering	Type
Faskine i ubefæstet areal	Typar SF 27
Faskine i befæstet areal	Typar SF 56

Samlinger foretages med et overlæg på min 20 cm.

**Forsinkelse/Opmagasiner.**

Ved etablering af bassin/magasin til forsinkelse af regnvand skal blokkene pakkes ind i en af nyrup plast anvist plastmembran med en beskyttende geotekstil (Brugerklasse 3) på den udvendige side.



**Komponentoversigt:**

**RIGO-fill regnvandsblokke**  
800x800x660mm  
np-nr. 262728-100



**RIGO-fill regnvandsblokke (Halve)**  
800x800x350mm  
np-nr. 262728-150



**Blokforbinder type 1**  
np-nr. 262728-200



**Blokforbinder type 2**  
np-nr. 262728-225



**Endegitter**  
np-nr. 262728-275



(Der benyttes 2 endegittere for hver åben ende af RIGO-fill blokkene).

**Goetekstil Typar SF 27**  
Bredde 3,2m  
np-nr. 245057-320



**Goetekstil Typar SF 56**  
Bredde 5,2m  
Np-nr. 245600-520

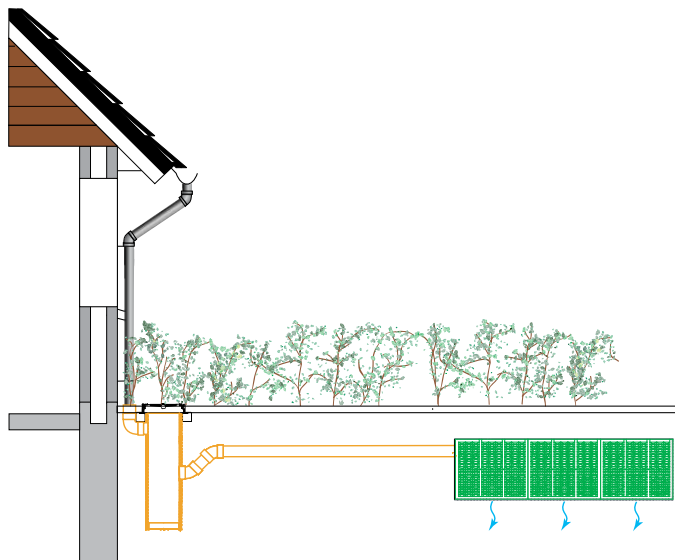


**Quadro-control**  
800x800x600mm,  
np-nr.. 262728-101

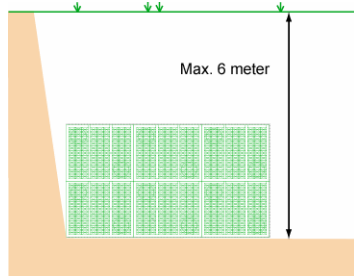




## Montering:



Udgravningen tilpasses **RIGO-fill regnvandsblokkenes** form og størrelse. Bunden afrettes med et min. 5 cm komprimeret lag af vasket grus med kornfordeling op til 8 mm. Udgravningen må maksimalt have en dybde på 6,0 m.



**Ved udgravning skal arbejdstilsynets krav altid overholdes.**



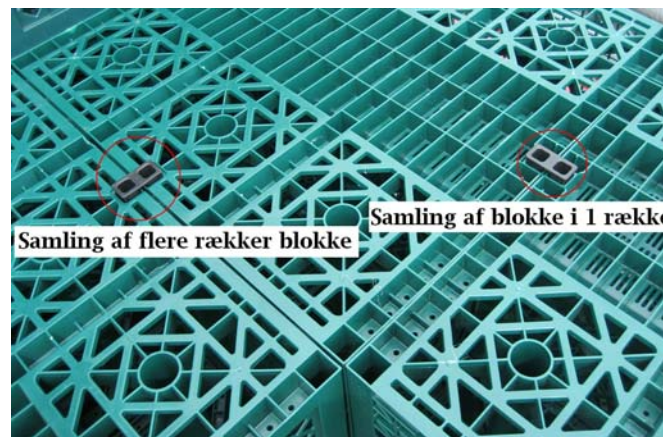
Vær opmærksom på at en korrekt dimensioneret og vedligeholdt **sandfangsbrønd** er vigtigste forudsætning for faskinens infiltrations kapacitet bibeholdes over tid.

## Samling af blokkene samt rørtilslutning:

Faskine i en række i et lag bruges 1 blokforbinder pr blok.



Faskine i flere rækker, i et lag, bruges der blokforbindere (type 1) til at samle på langs og tværs. Antal udregnes således: Antal blokke på langs L, antal blokke på tværs T.  
Antal blokforbindere =  $L \times T \times 2 - L$



Faskiner i flere lag, bruges ovenstående udregninger pr lag. Brug blokforbindere type 1, til øverste lag, og blokforbindere type 2, til de øvrige lag.

Tilslutning af rør Ø110, Ø160, Ø200 glat kloakrør, kan udføres på endegittrene. Tilslutning af Ø110 og Ø160mm glat kloakrør kan tillige tilsluttes i siden af blokken.

Tilslutning via rensebrønd eller Quadro-control gennem endegittre giver mulighed for inspektion og spuling.

Endegittrene på- og afmonteres uden brug af værktøj. Det anbefales at klippe hul til den ønskede rørdimension (f.eks. med bidetang) i gitter inden montering af dette.

Opfyldning omkring blokkene foretages med vasket grus (kornfordeling op til 8 mm). Opfyldningsmaterialer som er frosne eller kan vaskes væk må ikke anvendes (f.eks. lerholdige materialer).

Opfyldningsmaterialerne omkring blokkene stemples eller komprimeres med pladevibrator i lag af ca. 20 cm. Der anvendes vasket grus til min. 20 cm. over blokkene. Herefter kan der evt. anvendes stabilgrus adskilt af en geotekstil. Opfyld over blokkene må højst udgøre en tykkelse på 3,0 meter. (Opfyld > 3,0 meter kræver statiske beregninger).

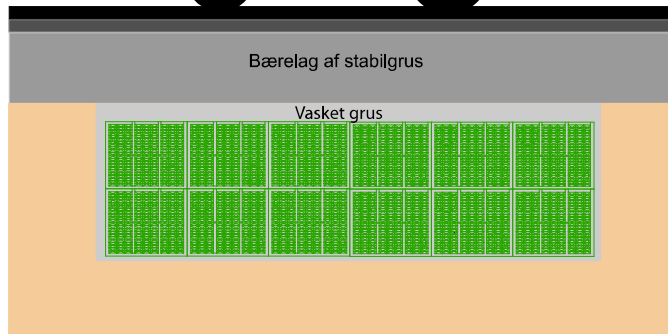
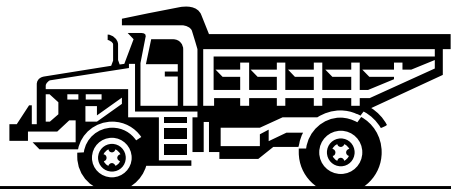


### Trafikbelastning:

Bassiner udført med **RIGO-fill regnvandsblokke** placeres under bærerlaget i en normal vejopbygning.

Lagtykkelsen på bærerlaget er afhængig af trafikbelastning.

Der anvendes Typar SF56 omkring faskinen ved trafikbelastning.

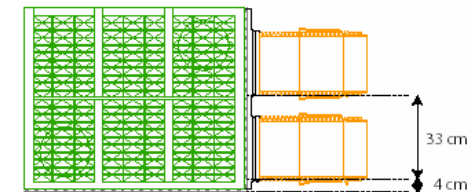


### Data:

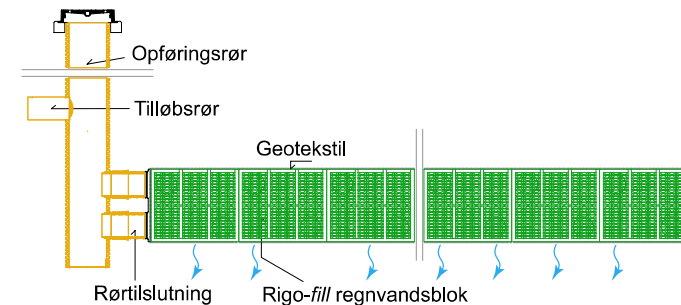
Data-angivelse pr. helblok

Dimension: (L x B x H)	800 x 800 x 660 mm
Materiale:	PP
Vægt:	20 kg
Opstuvningskapacitet:	95 %
Opsamlingskapacitet:	401 liter
Tilslutning på Endegitter:	Ø110, 160, 200mm

### Adgang for vedligehold:



Ved etablering af inspektionsbrønde er det muligt, at foretage en TV-inspektion og spuling af RIGO-fill systemet.



### nyrup plast

Kannikevej 1  
4296 Nyrup  
Tlf.: 57803100  
Fax.: 57803301  
E-mail: [admin@nyrupplast.dk](mailto:admin@nyrupplast.dk)  
<http://www.nyrupplast.dk>

September 2008