

Hydrologisk dimensionering av buffertmagasin för dagvatten

Matematiska principer härledda från regnserier

Joakim Pramsten

2018-03-12

Tillsammans för världens
mest hållbara stad



STOCKHOLM
VATTEN
OCH AVFALL

Rapport

Diarienummer
17MB734

Projektnummer
600346

Hydrologisk dimensionering av buffertmagasin för dagvatten

Matematiska principer härledda från regnserier

Joakim Pramsten
2018-03-12

© Stockholm Vatten och Avfall 2018

Författare: Joakim Pramsten, joakim.pramsten@svoa.se

Rapporten citeras: Pramsten, J. (2018). Hydrologisk dimensionering av buffertmagasin för dagvatten.

Matematiska principer härledda från regnserier. Stockholm Vatten och Avfall.

Internt Dnr: 17MB734

Kontaktuppgifter: Stockholm Vatten och Avfall, 106 36 Stockholm

Telefon: 08-522 120 00

Webb: www.svoa.se

Sammanfattning

Buffertmagasin för dagvatten definieras i denna undersökning som magasin vilka syftar till att fördröja momentana dagvattenflöden och fördela ut dem i tiden, så att en given andel av den totala årsavrinningen kan omhändertas och behandlas i efterföljande anläggningssteg.

Syftet med undersökningen har varit att finna praktiskt användbara dimensioneringssamband för buffertmagasin.

Undersökningen utgår från insikten att det regndjup som ett buffertmagasin med konstant avtappningskapacitet måste kunna inrymma för att omhänderta en given andel av årsavrinningen entydigt kan bestämmas med utgångspunkt från buffertmagasinets tömningstid.

Mot bakgrund av ovanstående insikt har ett grundläggande dimensioneringssamband för buffertmagasin tagits fram. Sambandet baseras på regnserier med högupplösta nederbördsdata från södra Sverige och kan antas gälla generellt inom denna region.

$$d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad \text{där} \quad \frac{1}{6} \leq \tau \leq 12$$

och d_r är dimensionerande regndjup [mm]

C_e är en konstant som anger hydrologisk effektivitet

τ är tömningstiden för magasinet [h]

Den hydrologiska effektivitetskonstanten C_e som ingår i dimensioneringssambandet beror av hur stor andel av årsavrinningen som ska kunna tas omhand av anläggningen. Konstanten väljs med ledning av nedanstående tabell.

Hydrologisk effektivitet	Typiskt värde för C_e	Troligt intervall för C_e
98 %	6,00	5,00 – 7,00
97 %	5,20	4,50 – 5,90
95 %	4,20	3,60 – 4,80
90 %	3,05	2,60 – 3,40
80 %	2,05	1,75 – 2,25
60 %	1,15	1,00 – 1,30

Det grundläggande dimensioneringssambandet visar god överensstämmelse med modellerade resultat för magasin med tömningstider mellan 10 minuter och 12 timmar.

Genom att kombinera det grundläggande dimensioneringssambandet med uttryck som beskriver magasinvolym och tömningstider för olika typer av magasinskonfigurationer har specifika dimensioneringssamband kunnat härledas för olika typer av magasin.

Exempel på anläggningstyper som kan beskrivas med metodiken är infiltrationsanläggningar med plan botten, filteranläggningar med en given filterarea samt anläggningar som via konstant pumpning eller avtappning avleder dagvatten till efterföljande anläggningssteg.

Dimensioneringssamband för ovanstående typer av anläggningar har härletts i utredningen och de härledda sambanden har samlats i ett appendix för att göra dem lättillgängliga för praktiskt bruk.

Inledning

Dagvatten tillrinner oregelbundet med stora variationer i tiden. Detta är en grundförutsättning för all dimensionering av dagvattenanläggningar.

Principer för beräkning av dimensionerande flöden med en viss återkomsttid och varaktighet finns sedan länge, liksom principer för dimensionering av utjämningsmagasin för olika återkomsttider. Dessa principer är användbara för att svara på frågor om vilka flöden och volymer en anläggning bör dimensioneras för om syftet med anläggningen är att inte riskera översvämning oftare än den valda återkomsttiden.

En annan typ av frågeställning är vilka flöden och volymer en anläggning bör dimensioneras för om syftet med anläggningen är att den inte ska brädda mer än en viss andel av den avrunna årsvolymen. Denna frågeställning uppstår typiskt i samband med olika typer av reningsanläggningar för dagvatten. Hittills har det saknats ett teoretiskt ramverk som kan användas för att på ett systematiskt och generellt sätt analysera och besvara denna frågeställning. I denna utredning presenteras insikter och resonemang som lägger grunden för ett sådant ramverk. Denna grund används sedan för att mer specifikt svara på frågeställningen för olika typer av anläggningar.

Definitioner

I denna undersökning införs benämningen buffertmagasin för magasin som syftar till att fördröja en viss andel av årsavrinningen.

I de resonemang som följer används nedanstående termer enligt de definitioner som anges här.

Definition 1: Med buffertmagasin avses ett magasin som syftar till att fördröja momentana dagvattenflöden och fördela ut dem i tiden så att en given andel av den totala årsavrinningen kan omhändertas och behandlas i efterföljande anläggningssteg.

Definition 2: Den hydrologiska effektiviteten hos ett buffertmagasin anger hur stor andel av årsavrinningen som kan buffras i magasinet. Resterande andel av årsavrinningen bräddar förbi magasinet.

Definition 3: Med dimensionerande regndjup avses det regndjup som behöver kunna magasineras i ett buffertmagasin för att en given hydrologisk effektivitet ska uppnås.

Definition 4: Med tömningstid avses den tid som fordras för att tömma ett fullt buffertmagasin under förutsättning att inget nytt vatten tillförs magasinet under tömningen.

Definition 5: Med ytan som bidrar med avrinning vid regn avses den till buffertmagasinet anslutna hårdgjorda ytan samt, i de fall magasinet är öppet så att regn kan falla rakt ner i det, även magasinets yta.

Grundläggande insikt

Antag att en avrinningsyta av okänd storlek belastas med nederbörd. Avrinningens volym kan då uttryckas som det regndjup som avrinner från ytan. Avrinningens storlek kan således uttryckas oberoende av ytans storlek.

Antag vidare att avrinningen sker mot ett magasin som rymmer ett givet regndjup. Magasinsvolymen som fordras för att rymma detta regndjup beror visserligen av avrinningsytans storlek men så länge magasinets volym uttrycks som ett regndjup kan även den uttryckas oberoende av ytans storlek.

Antag slutligen att magasinet har en konstant avtappningskapacitet som medför att hela magasinet töms på en given tid så länge inget nytt vatten tillförs. Avtappningskapaciteten kan då uttryckas som avtappat regndjup per tidsenhet och är i denna form oberoende av avrinningsytans storlek.

Komponenterna ovan bildar tillsammans ett system som kan beskrivas fullständigt trots att avrinningsytans storlek inte är bestämd. Detta möjliggörs genom att systemet beskrivs med volymer angivna som regndjup och med flöden angivna som regndjup per tidsenhet.

Genom att applicera en regnserie på ett system uppbyggt enligt ovan och studera hur stor andel av avrinningen som avtappas från magasinet, respektive hur stor andel som bräddas, kan systemets hydrologiska effektivitet bestämmas. De enda indata som behövs för beräkningen utöver regnserien är det regndjup som magasinet rymmer samt magasinets avtappningskapacitet, vilken kan uttryckas som en tömningstid eftersom magasinets volym är känd.

Detta resonemang kan sammanfattas i följande insikt:

Den hydrologiska effektiviteten för ett buffertmagasin som rymmer ett givet regndjup och har en konstant avtappningskapacitet kan entydigt bestämmas med utgångspunkt från magasinets tömningstid.

Givet att ovanstående gäller måste även det omvända gälla:

Det regndjup som ett buffertmagasin med konstant avtappningskapacitet måste kunna inrymma för att uppnå en given hydrologisk effektivitet kan entydigt bestämmas med utgångspunkt från buffertmagasinets tömningstid.

Numerisk modellering

En numerisk modell har tagits fram i syfte att beräkna hur stor andel av nederbördsavrinningen som kan tas omhand av ett buffertmagasin med en given volym (uttryckt som regndjup) och en konstant avtappningskapacitet (uttryckt som tömningstid).

Indata till modellen utgörs av högupplösta tidsserier med nederbördsmätningar från södra Sverige. Data från två olika källor har nyttjats i analysen. Den ena källan är data som samlades in och sammanställdes i samband med framtagandet av VA-forskrappport 2006-04 (Hernebring 2006). Den andra källan är data som har samlats in och sammanställts internt inom Stockholm Vatten (Stockholm Vatten 2016). Data från respektive källa har använts både som enskilda serier för olika orter och som sammanfogade serier benämnda "Sverige" respektive "Stockholm". En överblick av vilka data som ingår i respektive tidsserie ges i tabell 1 och 2. Tidsupplösningen i regnserierna ligger på minutnivå och de har använts i den form de funnits tillgängliga utan korrigeringar.

Tabell 1 Nederbördsserier som använts i tidsserien benämnd "Sverige".

Ort	Mätperiod
Borås	1982-2004
Göteborg	2000-2004
Halmstad	1992-2004
Helsingborg	1991-2004
Jönköping	1985-2004
Kalmar	1991-2004
Karlskrona	1998-2004
Karlstad	1994-2004
Malmö	1980-2004
Stockholm	1984-2004
Uddevalla	1993-2004
Uppsala	1993-2004
Växjö	1985-2004

Tabell 2 Nederbördsserier som använts i tidsserien benämnd "Stockholm".

Mätare	Mätperiod
Stockholm (Gubbängen)	2006-2015
Stockholm (Henriksdal)	2009-2015
Stockholm (Hässelby)	2008-2015
Stockholm (Skärholmen)	2006-2015
Stockholm (Tensta)	2008-2015
Stockholm (Torsgatan)	2008-2015
Stockholm (Trekanten)	2008-2015
Stockholm (Åkeshov)	2006-2015

Nederbörden från regnserierna ackumuleras i den framtagna modellen på en hårdgjord yta av obestämmd storlek. När det ackumulerade regndjupet på ytan överstiger 0,7 millimeter avleds överskottet till ett fiktivt buffertmagasin. Nederbörden som blir kvar på ytan antas avdunsta med en hastighet motsvarande den potentiella evapotranspirationen enligt tabell 3.

Ovanstående ansats medför att ungefär 20 procent av årsnederbörden antas avdunsta medan resterande 80 procent bildar avrinning. Vattnet som avleds från ytan mot buffertmagasinet fyller i modellen på magasinet samtidigt som en tömning av magasinet sker baserad på vald avtappningskapacitet för magasinet.

Tabell 3 Månadsvärden på potentiell evapotranspiration i Stockholm enligt Eriksson (1981).

Månad	Potentiell evapotranspiration [mm/månad]	Månad	Potentiell evapotranspiration [mm/månad]
Januari	3	Juli	127
Februari	6	Augusti	95
Mars	20	September	48
April	53	Oktober	17
Maj	104	November	3
Juni	139	December	0

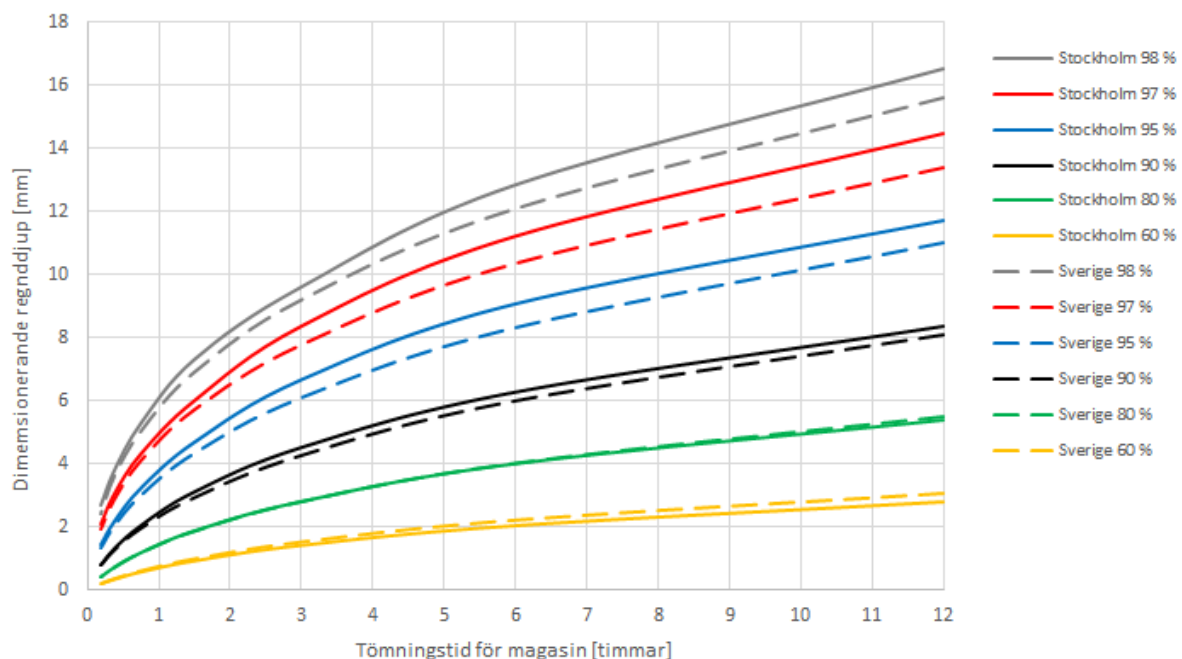
Om det modellerade tillflödet till magasinet i ett tidssteg blir så stort att den volym som skulle behöva lagras i magasinet överskrider magasinets volym bräddas den överskjutande volymen förbi magasinet. Hur stor andel av avrinningen som bräddas förbi magasinet beror både av magasinets volym och av dess avtappningskapacitet.

Flöden som avtappas genom buffertmagasinet räknas som omhändertagna av magasinet medan flöden som bräddas förbi magasinet räknas som ej omhändertagna. Genom att summera dessa flöden över tid beräknar modellen hur stor andel av det till magasinet tillförda flödet som kan omhändertas och hur stor andel som bräddas.

Modellen har körts för olika kombinationer av magasinens volymer och avtappningskapaciteter. Genom att studera en tömningstid i taget, och för respektive tömningstid beräkna den volym som krävs för att uppnå en viss hydrologisk effektivitet, har dimensionerande magasinens volymer för magasin med olika hydrologisk effektivitet kunnat avsättas mot tömningstiden. Resultatet redovisas i figur 1.

Eftersom magasinens volym, avtappningskapacitet och tömningstid alla beror av varandra har ovanstående beräkningar fått utföras genom ett passningsförfarande. Först väljs en tömningstid och därefter ansätts en magasinens volym. Med utgångspunkt från dessa kan en tömningskapacitet beräknas. Modellen har sedan körts med dessa indata och genererat en hydrologisk effektivitet. Om den hydrologiska effektiviteten avviker från önskat värde har magasinens volymen och den därav följande avtappningskapaciteten justerats, varefter modellkörningen har upprepats. Denna process har fått fortgå till dess den efterfrågade hydrologiska effektiviteten har uppnåtts.

Av resultaten i figur 1 framgår att det finns ett klart och tydligt samband mellan tömningstid och dimensionerande regndjup för de undersökta hydrologiska effektiviteterna. Sambandet tycks vara relativt konsistent mellan de båda regnserierna även om Stockholmsserien ger något högre värden för de dimensionerande regndjupen, särskilt för buffertmagasin med hög hydrologisk effektivitet.



Figur 1 Resultat av modellkörningar med två regnserier benämnda "Stockholm" och "Sverige". För respektive regnserie har dimensionerande regndjup beräknats för olika tömningstider vid olika hydrologiska effektiviteter.

Grundläggande dimensioneringssamband

Ett grundläggande dimensioneringssamband för buffertmagasin har tagits fram med utgångspunkt från modellresultaten. Sambandet visar god överensstämmelse med modellerade resultat för magasin med tömningstider mellan 10 minuter och 12 timmar:

$$d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad (\text{ekvation 1})$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \tau \leq 12$$

och d_r är dimensionerande regndjup [mm]

C_e är en konstant som anger hydrologisk effektivitet

τ är tömningstiden för magasinet [h]

Den hydrologiska effektivitetskonstanten C_e som ingår i funktionen beror av vilken hydrologisk effektivitet som eftersträvas.

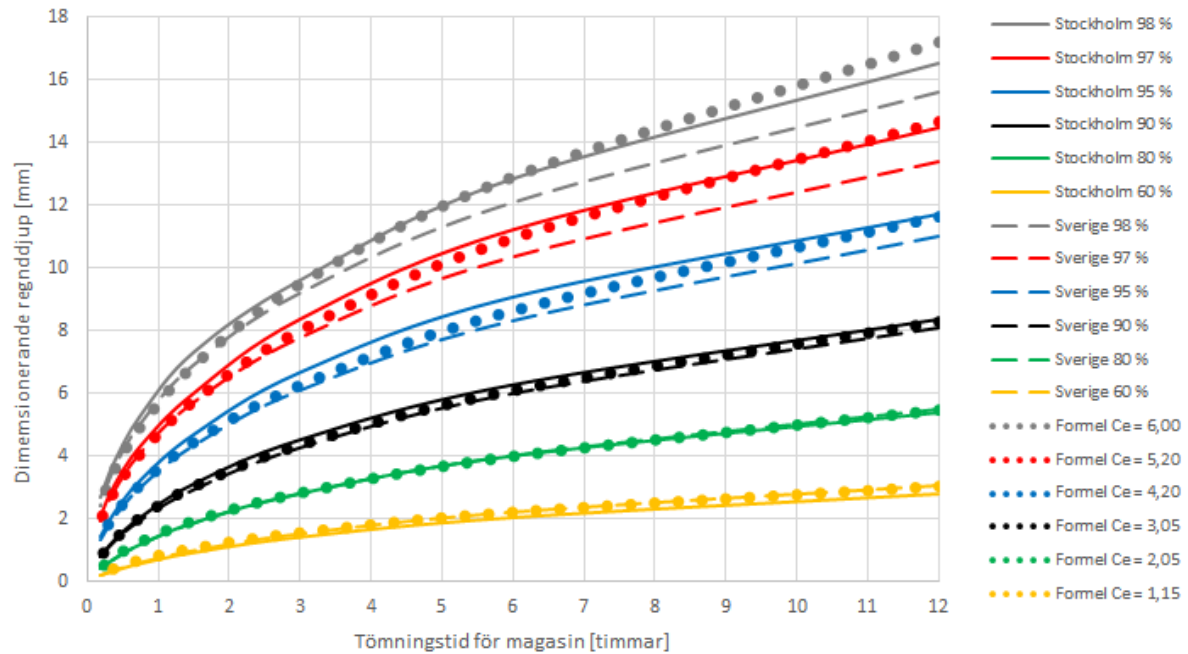
Tabell 4 Värden på den hydrologiska effektivitetskonstanten C_e .

Hydrologisk effektivitet	Typiskt värde för C_e	Troligt intervall för C_e
98 %	6,00	5,00 – 7,00
97 %	5,20	4,50 – 5,90
95 %	4,20	3,60 – 4,80
90 %	3,05	2,60 – 3,40
80 %	2,05	1,75 – 2,25
60 %	1,15	1,00 – 1,30

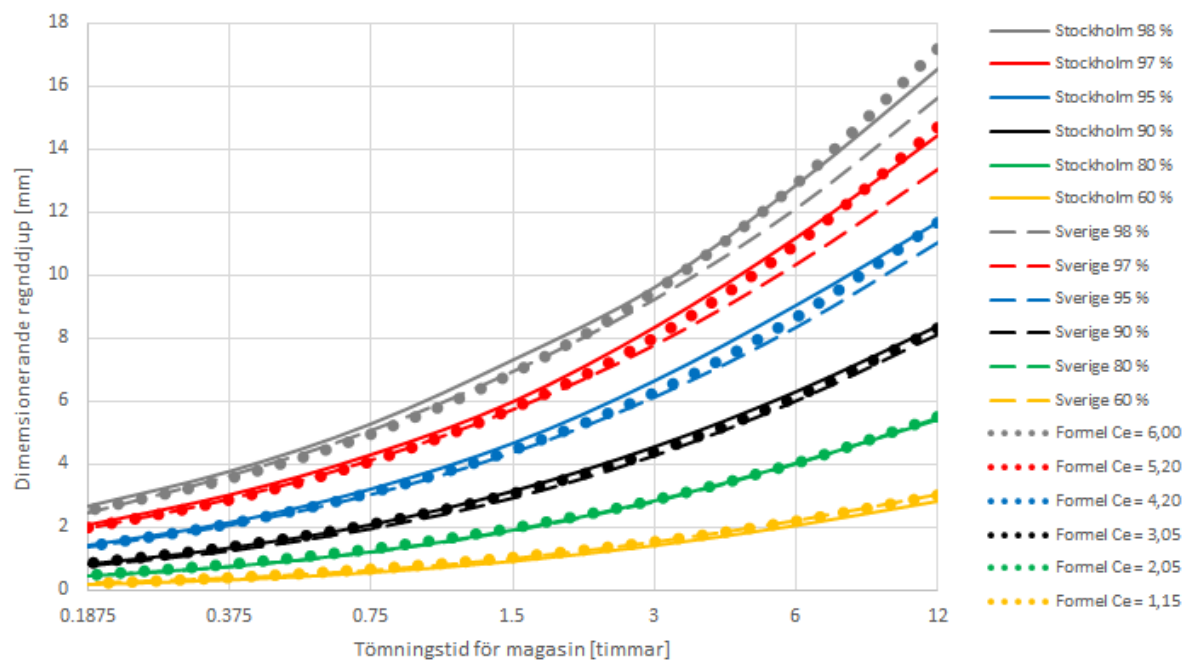
Hur ekvation 1 ansluter till modellresultaten för de sammanfogade regnserierna benämnda "Stockholm" och "Sverige" redovisas i figur 2a och 2b. Ekvation 1 har här använts med de värden för C_e som anges som typiska i tabell 4. Figur 2a redovisar tömningstiden med en linjär skala medan figur 2b redovisar tömningstiden med en logaritmisk skala, i övrigt är figurerna identiska. Som synes ansluter ekvation 1 relativt väl till modellerade värden.

Hur ekvation 1 ansluter till modellerade resultat för enskilda regnserier redovisas i figur 2a-3f. I figurerna redovisas värden genererade från ekvation 1 med C_e -värden valda till yttervärdena i det intervall som benämns som troligt i tabell 4. I respektive figur redovisas även spridningen av modellresultat för enskilda regnserier för den aktuella hydrologiska effektiviteten. Som synes håller sig de modellerade värdena i stor utsträckning inom det intervall som anges som troligt. För höga värden på den hydrologiska effektiviteten (>95 %) ökar spridningen mellan regnserierna, vilket kan förklaras med att enskilda extrema händelser eller mätfel kan antas få mer genomslag. Eftersom det bara är enstaka regnserier som tydligt sticker ut på vardera sidan om intervallet bedöms intervallet, trots dessa avvikelser, vara tillämpligt för de flesta orter i södra Sverige.

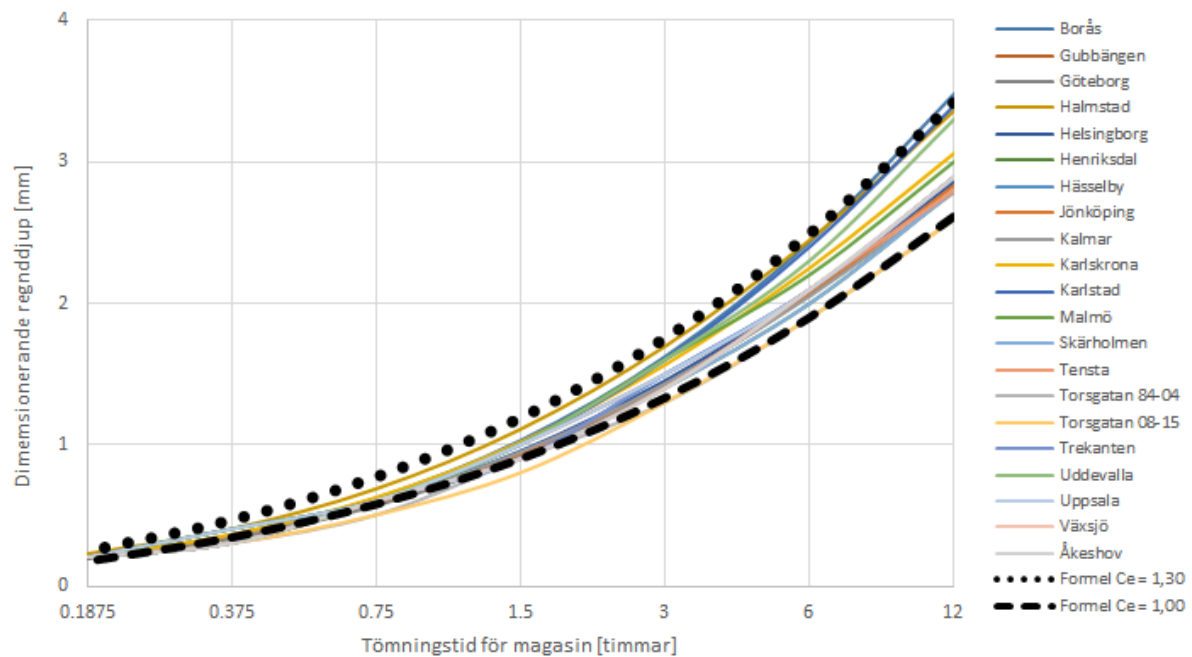
Hänsyn till snösmältning har ej tagits i modellberäkningarna, för detta fordras en mer avancerad modellansats än den som här använts. I tätortsmiljöer sker dessutom ofta rundkörning eller bortkörning av snö, vilket ytterligare försvårar analysen. En närmare studie av modellresultaten visar att den bräddning som modellen räknar fram med utgångspunkt från regnserierna bara sällan sker vintertid. Viss bräddning kan naturligtvis tänkas ske i samband med snösmältning, men eftersom snösmältning sällan ger upphov till flöden med hög intensitet torde effekterna av snösmältning inte nämnvärt påverka tillämpbarheten av ekvation 1 med de värden på C_e som redovisas i tabell 4.



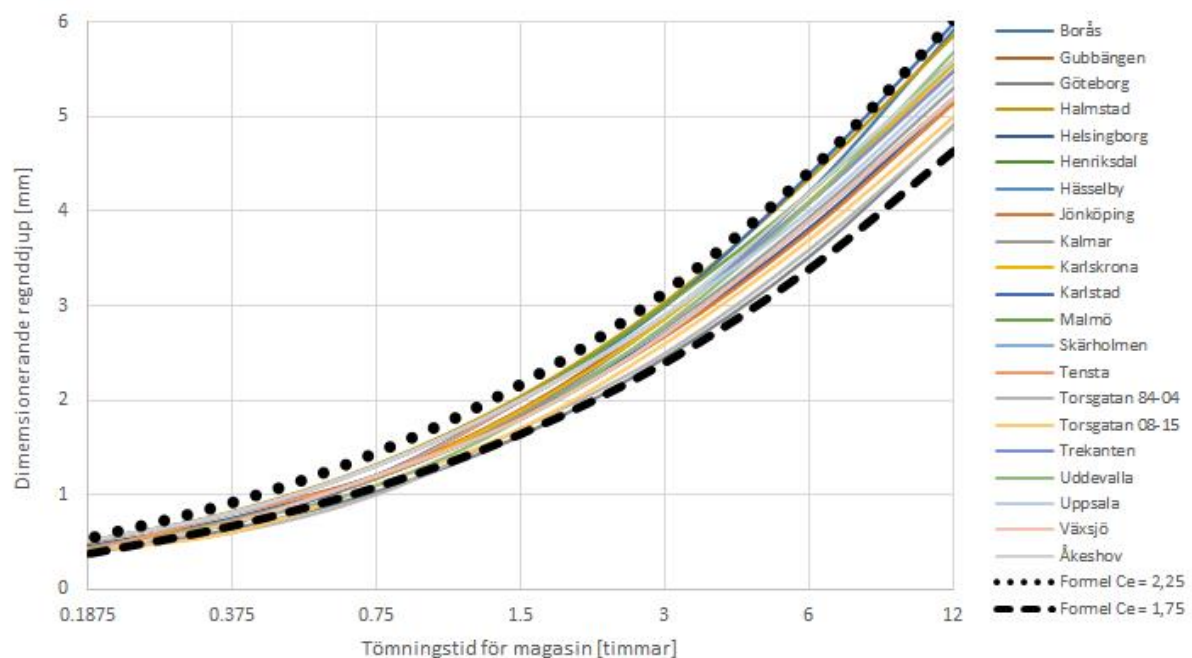
Figur 2a Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultaten av modellkörningarna med de båda regnserierna "Stockholm" och "Sverige".



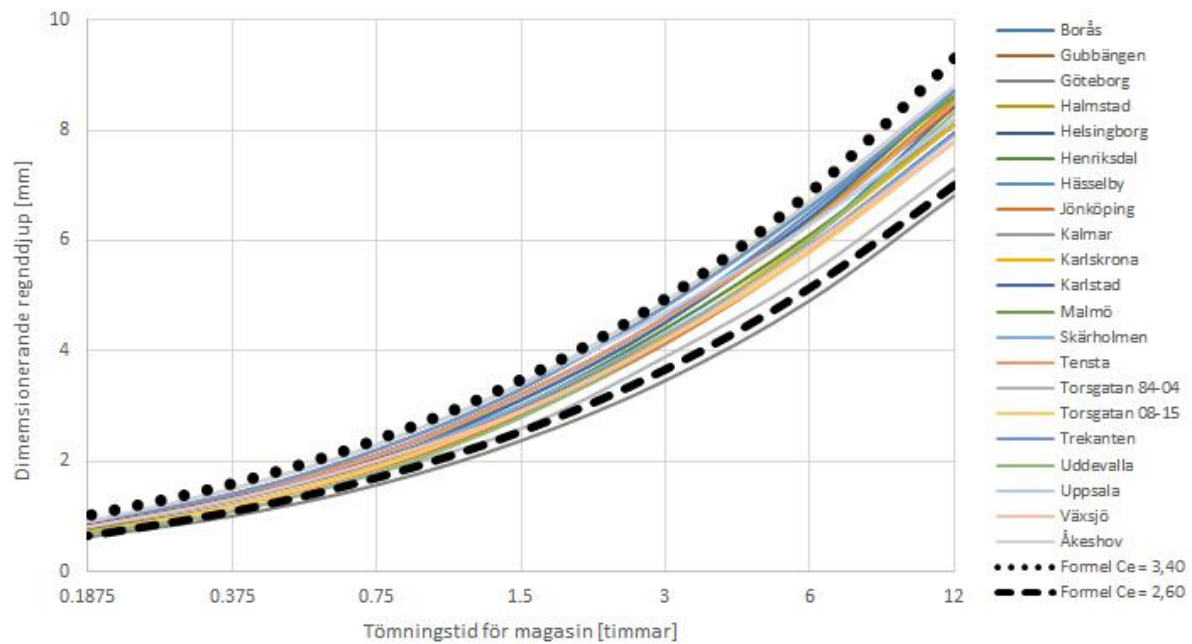
Figur 2b Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultaten av modellkörningarna med de båda regnserierna "Stockholm" och "Sverige".



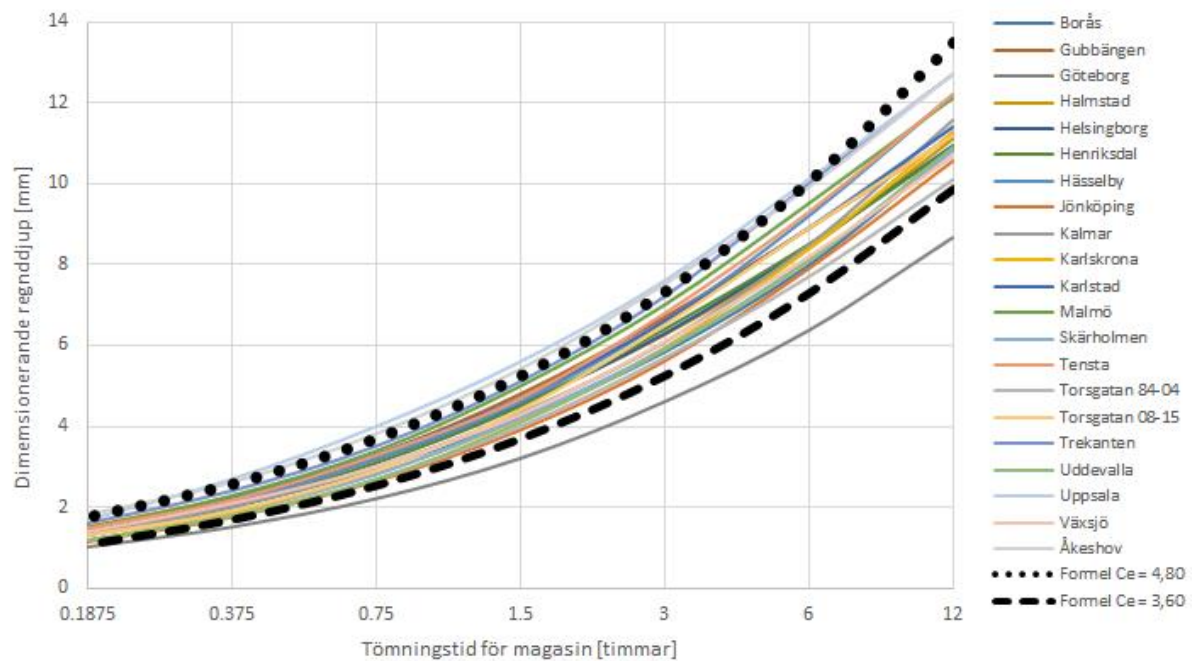
Figur 3a Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultat av modellkörningar för enskilda regnserier med hydrologisk effektivitet 60 %.



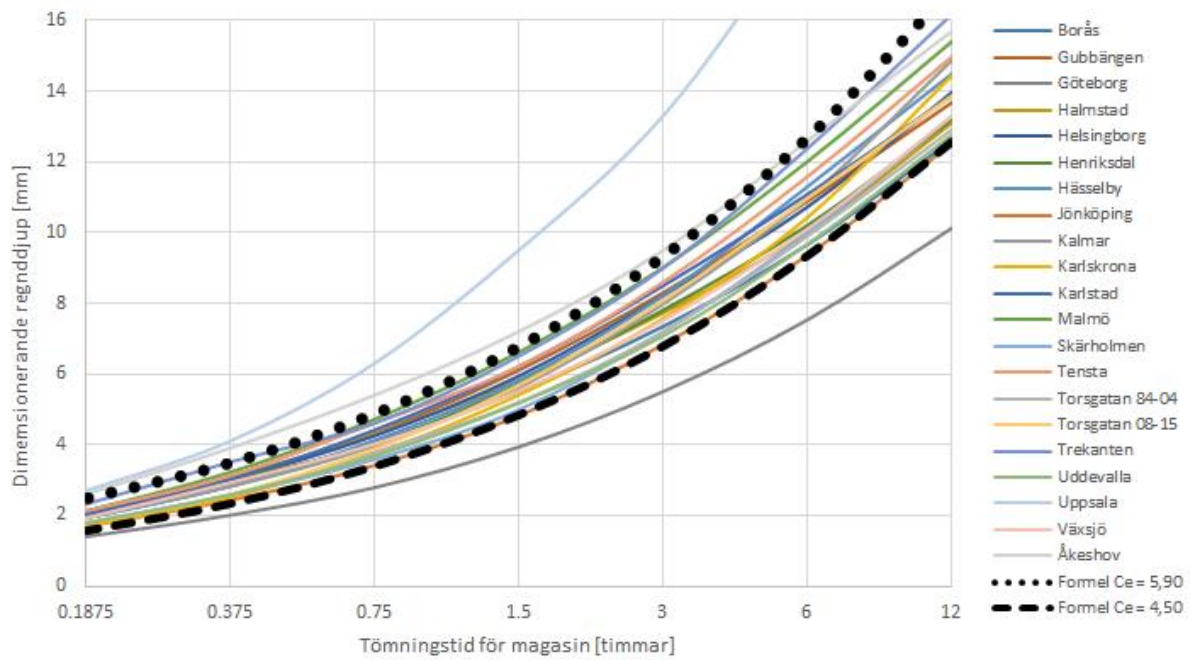
Figur 3b Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultat av modellkörningar för enskilda regnserier med hydrologisk effektivitet 80 %.



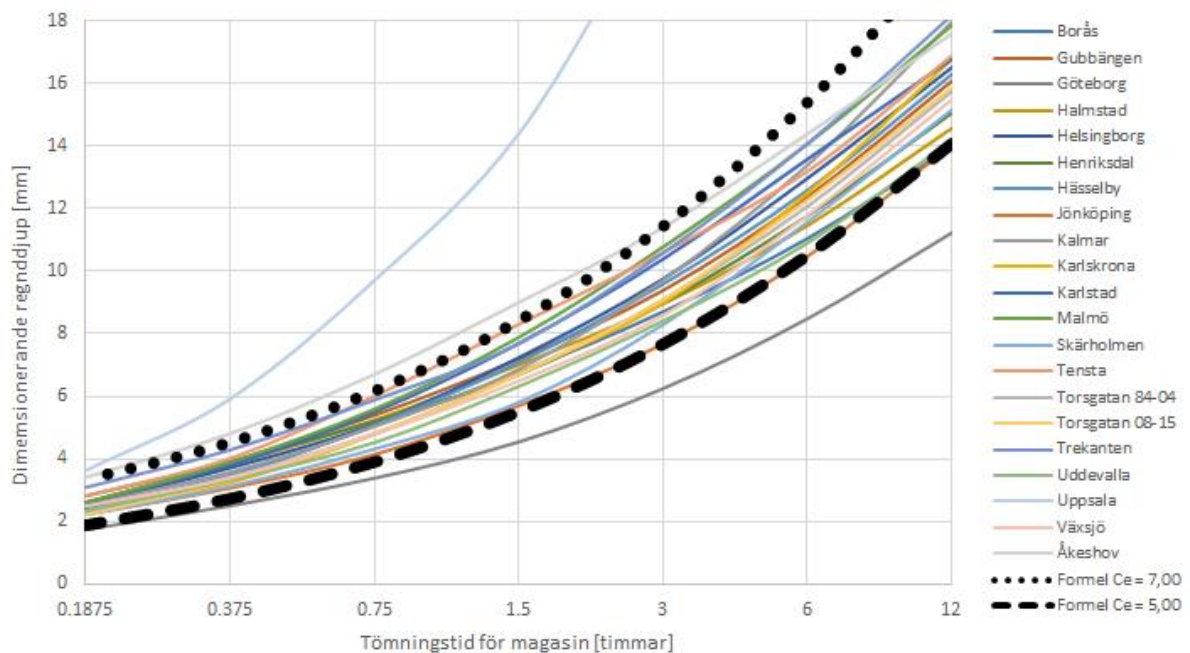
Figur 3c Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultat av modellkörningar för enskilda regnserier med hydrologisk effektivitet 90 %.



Figur 3d Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultat av modellkörningar för enskilda regnserier med hydrologisk effektivitet 95 %. Göteborg sticker ut på undersidan om intervallet.



Figur 3e Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultat av modellkörningar för enskilda regnserier med hydrologisk effektivitet 97 %. Göteborg sticker ut på undersidan av intervallet medan Uppsala, och i viss mån Åkeshov, sticker ut på ovansidan.



Figur 3f Jämförelse mellan ekvationen $d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right)$ och resultat av modellkörningar för enskilda regnserier med hydrologisk effektivitet 98 %. Göteborg sticker ut på undersidan av intervallet medan Uppsala, och i viss mån Åkeshov, sticker ut på ovansidan.

Vidareutveckling av dimensioneringssamband

Eftersom den dimensionerande magasinvolymen måste vara densamma som den dimensionerande regnvolymeren gäller:

$$A_r d_r = A_m d_m \quad \text{där } A_r \text{ är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m}^2\text{]} \\ d_r \text{ är dimensionerande regndjup [mm]} \\ A_m \text{ är magasinets bottenarea [m}^2\text{]} \\ d_m \text{ är magasinetsdjup [mm]}$$

$$d_r = \frac{A_m d_m}{A_r} \quad (\text{ekvation 2})$$

Ekvation 1 och 2 ger:

$$\frac{A_m d_m}{A_r} = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad (\text{ekvation 3})$$

För infiltrationsanläggningar med plan botten och konstant infiltration genom hela bottenytan gäller:

$$\tau = \frac{d_m}{f_c} \quad (\text{ekvation 4})$$

där τ är tömningstiden för magasinet [h]
 d_m är magasinetsdjup [mm]
 f_c är infiltrationshastigheten [mm/h]

Ekvation 4 i ekvation 3 ger:

$$\frac{A_m d_m}{A_r} = C_e \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20 f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right) \\ A_m = \frac{C_e A_r}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20 f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad (\text{ekvation 5})$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \frac{d_m}{f_c} \leq 12$$

och A_m är magasinets bottenarea [m²]
 C_e är den hydrologiska effektivitetskonstanten (1-7)
 A_r är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m²]
 d_m är magasinetsdjup [mm]
 f_c är infiltrationshastigheten [mm/h]

För öppna infiltrationsanläggningar (anläggningar i vilka regn kan falla rakt ner i magasinet) måste själva magasinetsytan inräknas i A_r eftersom nederbörden som faller direkt på magasinet utgör en del av den nederbörd som tillförs anläggningen. För öppna infiltrationsanläggningar kan ekvation 5 därför användas för att beräkna hur stor magasinetsyta som fordras om det som är givet är den totala ytan som finns att tillgå för både magasin och hårdgjorda ytor.

Om det som är givet istället är den hårdgjorda ytan, och magasinetsyta för ett öppet magasin ska beräknas med utgångspunkt från denna, kan följande samband nyttjas:

$$A_r = A_m + A_h \quad (\text{ekvation 6})$$

där A_r är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m²]
 A_m är magasinets bottenarea [m²]
 A_h är arean på den anslutna hårdgjorda ytan [m²]

Ekvation 6 i ekvation 5 ger:

$$A_m = \frac{C_e(A_m + A_h)}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)$$

$$A_m = \frac{C_e A_m}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right) + \frac{C_e A_h}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)$$

$$A_m - \frac{C_e A_m}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right) = \frac{C_e A_h}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)$$

$$A_m \left(1 - \frac{C_e}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right) \right) = \frac{C_e A_h}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)$$

$$A_m = \frac{\frac{C_e A_h}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)}{1 - \frac{C_e}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)}$$

$$A_m = \frac{A_h}{\frac{C_e \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)}{d_m} - 1}$$

$$A_m = \frac{A_h}{\frac{d_m}{C_e \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)} - 1} \quad (\text{ekvation 7})$$

där $\frac{1}{6} \leq \frac{d_m}{f_c} \leq 12$

och A_m är magasinets bottenarea [m^2]

A_h är arean på den anslutna hårdgjorda ytan [m^2]

d_m är magasinets djup [mm]

C_e är den hydrologiska effektivitetskonstanten (1-7)

f_c är infiltrationshastigheten [mm/h]

Både ekvation 5 och ekvation 7 kan alltså användas för att beräkna erforderlig anläggningsyta för öppna infiltrationsanläggningar med plan botten och ovanpåliggande buffertmagasin. Valet av ekvation avgörs av vad som är givet. Är det den totala ytan som bidrar med nederbörd som är given, inklusive själva anläggningsytan, används ekvation 5. Är det bara den hårdgjorda ytan som är given, exklusive själva anläggningsytan, används ekvation 7.

För anläggningar som ej har plan botten med infiltration genom hela bottenytan, men som ändå har en konstant avtappning, kan ett mer generellt uttryck tas fram för magasinets volym baserat på följande omformulering av ekvation 2:

$$d_r = \frac{1000V_m}{A_r} \quad (\text{ekvation 8})$$

där d_r är dimensionerande regndjup [mm]

V_m är magasinets volym [m^3]

A_r är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m^2]

Ekvation 1 och 8 ger:

$$\frac{1000V_m}{A_r} = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad (\text{ekvation 9})$$

För anläggningar med en konstant avtappning på ω kubikmeter per timme gäller:

$$\tau = \frac{V_m}{\omega} \quad (\text{ekvation 10})$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \frac{V_m}{\omega} \leq 12$$

Ekvation 10 i ekvation 9 ger:

$$\frac{1000V_m}{A_r} = C_e \left(\sqrt{\frac{V_m}{\omega}} - \frac{V_m}{20\omega} - \frac{6-C_e}{20} \right)$$

$$\frac{1000}{C_e A_r} \cdot V_m = \sqrt{\frac{V_m}{\omega}} - \frac{V_m}{20\omega} - \frac{6-C_e}{20}$$

$$\left(\frac{1000}{C_e A_r} + \frac{1}{20\omega} \right) V_m + \frac{6-C_e}{20} = \sqrt{\frac{V_m}{\omega}} \quad (\text{ekvation 11})$$

Låt:

$$\alpha = \frac{1000\omega}{C_e A_r} + \frac{1}{20}$$

$$\frac{\alpha}{\omega} = \frac{1000}{C_e A_r} + \frac{1}{20\omega} \quad (\text{ekvation 12})$$

Låt vidare:

$$\beta = \frac{6-C_e}{20} \quad (\text{ekvation 13})$$

Insättning av ekvation 12 och 13 i ekvation 11 ger:

$$\frac{\alpha}{\omega} \cdot V_m + \beta = \sqrt{\frac{V_m}{\omega}}$$

$$\left(\frac{\alpha}{\omega} \cdot V_m + \beta \right)^2 = \frac{V_m}{\omega}$$

$$\left(\frac{\alpha}{\omega} \cdot V_m \right)^2 + \beta^2 + \frac{2\alpha\beta}{\omega} \cdot V_m - \frac{1}{\omega} \cdot V_m = 0$$

$$\left(\frac{\alpha}{\omega} \cdot V_m \right)^2 + \beta^2 + \left(\frac{2\alpha\beta}{\omega} - \frac{1}{\omega} \right) V_m = 0$$

$$V_m^2 + \left(\frac{\beta\omega}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{2\beta\omega}{\alpha} - \frac{\omega}{\alpha^2} \right) V_m = 0$$

$$V_m^2 + \left(\frac{2\beta\omega}{\alpha} - \frac{\omega}{\alpha^2} \right) V_m + \left(\frac{\beta\omega}{\alpha} \right)^2 = 0$$

Lösning av andragradsekvationen ger:

$$V_m = - \left(\frac{2\beta\omega}{2\alpha} - \frac{\omega}{2\alpha^2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{2\beta\omega}{2\alpha} - \frac{\omega}{2\alpha^2} \right)^2 - \left(\frac{\beta\omega}{\alpha} \right)^2}$$

$$V_m = \frac{\omega}{2\alpha^2} - \frac{\beta\omega}{\alpha} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega}{2\alpha^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\beta\omega}{\alpha} \right) \left(\frac{\omega}{2\alpha^2\omega} \right)}$$

$$V_m = \frac{\omega}{2\alpha^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega}{2\alpha^2}\right)^2 - \left(\frac{\beta\omega^2}{\alpha^3}\right)} - \frac{\beta\omega}{\alpha}$$

$$V_m = \frac{\omega}{2\alpha^2} \pm \left(\frac{\omega}{2\alpha^2}\right) \sqrt{1 - 4\alpha\beta} - \frac{\beta\omega}{\alpha}$$

$$V_m = \frac{\omega}{2\alpha^2} (1 \pm \sqrt{1 - 4\alpha\beta}) - \frac{2\beta\omega}{2\alpha^2}$$

$$V_m = \frac{(1 \pm \sqrt{1 - 4\alpha\beta} - 2\alpha\beta)\omega}{2\alpha^2} \quad (\text{ekvation 14})$$

Eftersom en ökning av den hydrologiska effektivitetskonstanten (C_e) liksom en ökning av den nederbördsbelastade ytan (A_r) måste leda till en ökning av den dimensionerande buffertvolymen (V_m) måste värdet av uttrycket $\pm \sqrt{1 - 4\alpha\beta}$ i ekvation 14 öka när någon av dessa parametrar ökar. Vidare måste en ökning av avtappningen (ω) leda till en minskning av den dimensionerande buffertvolymen. Dessa villkor uppfylls endast för positivt tecken framför rottecknet.

Den dimensionerande buffertvolymen för ett magasin med en konstant avtappning på ω kubikmeter per timme erhålls alltså av andradgradsekvationens positiva rot:

$$V_m = \frac{(1 + \sqrt{1 - 4\alpha\beta} - 2\alpha\beta)\omega}{2\alpha^2} \quad (\text{ekvation 15})$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \frac{V_m}{\omega} \leq 12$$

och V_m är magasinetsvolymen [m^3]

$$\alpha = \left(\frac{1000\omega}{C_e A_r} + \frac{1}{20} \right)$$

$$\beta = \frac{6 - C_e}{20}$$

ω är avtappningen från magasinet [m^3/h]

C_e är den hydrologiska effektivitetskonstanten (1-7)

A_r är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m^2]

Ekvation 15 är en generell formel som kan användas för att beräkna erforderlig volym för alla typer av buffertmagasin med konstant avtappning, så länge uttrycket under rottecknet är positivt.

För buffertmagasin med en konstant avtappning på f_c millimeter per timme genom ett filter med arean A_f gäller:

$$\omega = \frac{f_c A_f}{1000} \quad (\text{ekvation 16})$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \frac{1000V_m}{f_c A_f} \leq 12$$

och ω är avtappningen från magasinet [m^3/h]

f_c är filterhastigheten [mm/h]

A_f är filterarean [m^2]

För buffertmagasin med en konstant avtappning på q_m liter per sekund gäller:

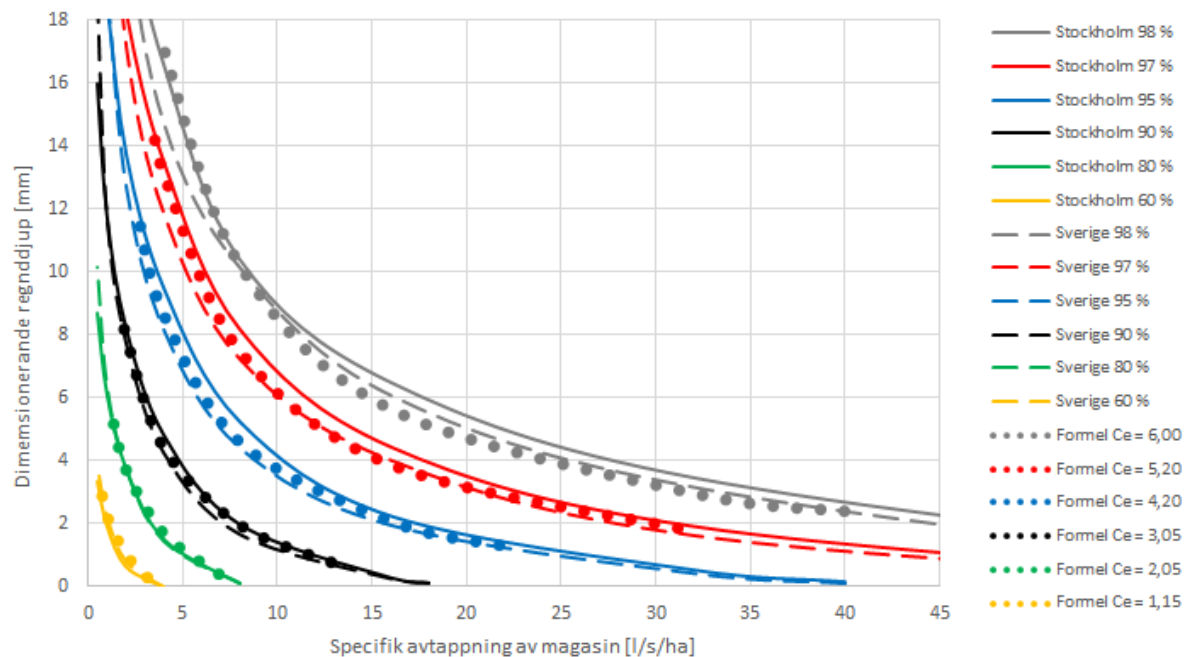
$$\omega = 3,6q_m \quad (\text{ekvation 17})$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \frac{V_m}{3,6q_m} \leq 12$$

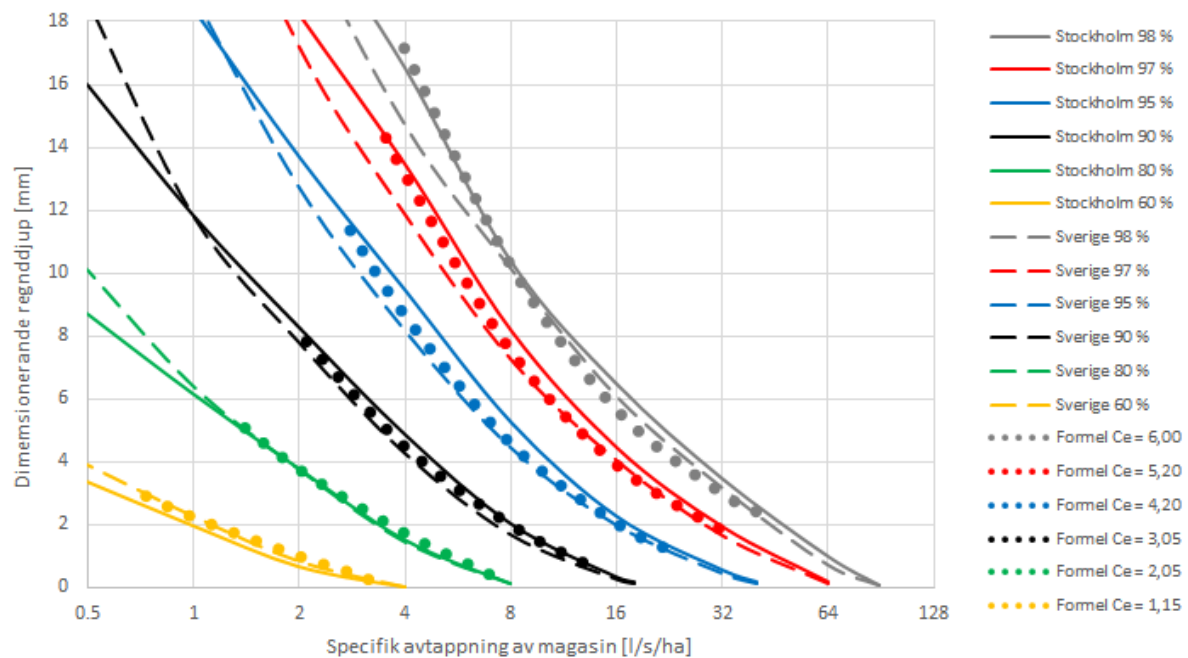
och ω är avtappningen från magasinet [m^3/h]

q_m är avtappningen från magasinet [l/s]

Ekvation 15 med ω beräknat enligt ekvation 17 illustreras grafiskt i figur 4a och 4b tillsammans med modellerade värden. Figur 8a redovisar tömningstiden med en linjär skala medan figur 8b redovisar tömningstiden med en logaritmisk skala, i övrigt är figurerna identiska. Som synes ansluter ekvation 15 relativt väl till modellerade värden.



Figur 4a Jämförelse mellan ekvationen $V_m = \frac{(1 \pm \sqrt{1 - 4\alpha\beta} - 2\alpha\beta)\omega}{2\alpha^2}$ och resultaten av modellkörningarna med de båda regnserierna "Stockholm" och "Sverige" (V_m omräknat till regndjup).



Figur 4b Jämförelse mellan ekvationen $V_m = \frac{(1 \pm \sqrt{1 - 4\alpha\beta} - 2\alpha\beta)\omega}{2\alpha^2}$ och resultaten av modellkörningarna med de båda regnserierna "Stockholm" och "Sverige" (V_m omräknat till regndjup).

Ej buffrade flöden

Hur stora flöden som måste kunna tas omhand för att uppnå en given hydrologisk effektivitet, utan hjälp av buffertmagasin, kan grovt utläsas ur figur 4a respektive 4b. Mer precisa skattningar av dessa flöden baserade på modellresultaten redovisas i tabell 5. Det bör noteras att någon hänsyn till rinntid ej tagits i de bakomliggande beräkningarna. Om rinntiden beaktas är det troligt att värdena i tabell 5 skulle kunna sänkas något.

Tabell 5 Flöde som måste kunna tas omhand för att uppnå en given hydrologisk effektivitet utan hjälp av buffertmagasin.

Hydrologisk effektivitet	Typiskt erforderligt värde för omhändertagande av obuffrat flöde [l/s/ha]
98 %	90
97 %	64
95 %	40
90 %	18
80 %	8
60 %	4

För genomsläppliga beläggningar, där ytan som bidrar med avrinning vid regn är lika stor som ytan genom vilken vatten infiltrerar, kan de erforderliga obuffrade flödena i tabell 5 omräknas till erforderliga infiltrationskapaciteter. Resultatet av en sådan omräkning redovisas i tabell 6. Tabellen förutsätter att det endast är nederbörd som faller direkt på den genomsläppliga beläggningen som ska omhändertas. Om flöden från omgivande ytor avleds mot den genomsläppliga beläggningen måste den erforderliga infiltrationskapaciteten för den beläggningen ökas, hur mycket beror på areaförhållandet mellan den avledande ytan och den genomsläppliga beläggningens yta.

Tabell 6 Erforderlig infiltrationskapacitet för att en genomsläpplig beläggning ska kunna uppnå en given hydrologisk effektivitet utan hjälp av en buffrande volym på markytan.

Hydrologisk effektivitet	Typiskt erforderligt värde på infiltrationskapacitet för genomsläpplig beläggning [mm/h]
98 %	33
97 %	23
95 %	15
90 %	7
80 %	3
60 %	2

De värden som benämnts som typiska i tabell 5 och 7 baseras på data från de sammanfogade regnserierna "Sverige" och "Stockholm". Något intervall för spridning i resultaten mellan olika orter har inte tagits fram. Detta bör beaktas i de fall resultaten ska ligga till grund för dimensionering, så att lämpliga säkerhetsmarginaler läggs på efter behov. Viss säkerhetsmarginal torde dock finnas redan i tabellresultaten eftersom dessa har tagits fram utan hänsyn till rinntid.

Slutord

Den mest direkta och påtagliga nyttan av detta arbete utgörs kanske av de härledda formelnerna för dimensionering av buffertmagasin för södra Sverige vilka har samlats i arbetets appendix. Det torde dock vara de underliggande resonemangen och insikterna som utgör arbetets väsentligaste delar, eftersom de kan nyttjas för vidare utveckling av formler och samband. De grundläggande insikter som framförs i detta arbete, och på vilka de härledda resultaten vilar, sammanfattas därför kort nedan:

1. Många dagvattenbehandlingsanläggningar innehåller steg med begränsad genomströmningsskapacitet vilka föregås av ett steg med utjämnande funktion. Det utjämnande steget kan därmed betraktas som ett buffertmagasin med efterföljande behandlingssteg. Buffertvolymens storlek avgör i dessa fall, tillsammans med de efterföljande behandlingsstegens genomströmningsskapacitet, hur stor andel av årsavrinningen som anläggningen som helhet kan ta omhand.
2. Det regndjup som ett buffertmagasin med konstant avtappningskapacitet måste kunna rymma, för att omhänderta en given andel av avrinningen från en regnserie, kan entydigt bestämmas med utgångspunkt från magasinets tömningstid. Det dimensionerande regndjupet för ett buffertmagasin kan därför uttryckas som en funktion av tömningstiden.
3. Genom att ta fram ett funktionsuttryck enligt punkten ovan och kombinera det med anläggnings-specifika samband, som beskriver magasinens volymer och tömningstider för olika anläggningstyper, kan anläggningsspecifika ekvationer ställas upp, ur vilka eftersökta parametrar kan lösas ut.
4. Metodiken kan tillämpas på alla typer av anläggningar där dagvatten tillrinner till ett magasin som har en konstant avtappningskapacitet. Exempel på anläggningstyper som kan beskrivas med metodiken är infiltrationsanläggningar med plan botten, filteranläggningar med en given filterarea samt anläggningar som via konstant pumpning eller avtappning avleder dagvatten till efterföljande anläggningssteg.

Med utgångspunkt från ovanstående insikter borde dimensioneringssamband kunna tas fram även för andra klimatförhållanden och anläggningstyper än de som redogjorts för i detta arbete.

Referenser

Eriksson, B. (1981)

Den potentiella evapotranspirationen i Sverige

SMHI, RMK nr 28

Hernebring, C. (2006)

10 års-regnets återkomst förr och nu – Regndata för dimensionering/kontrollberäkning av VA-system i tätorter

Rapport nr 2006-04, VA-forsk

Regndatadokumentationen finns tillgänglig på internet:

<http://vav.griffel.net/filer/Regndatadokumentation.zip>

Stockholm Vatten (2016)

Data sammanställd från Stockholm Vattens regnmätare 2006-2015 (ej publicerad data).

Appendix – Formler och tabeller

Den hydrologiska effektivitetskonstanten C_e som ingår i formlerna beror av vilken hydrologisk effektivitet som eftersträvas. Konstanten väljs med ledning av nedanstående tabell som kan antas gälla för dagens klimat i södra Sverige.

Hydrologisk effektivitet	Typiskt värde för C_e	Troligt intervall för C_e
98 %	6,00	5,00 – 7,00
97 %	5,20	4,50 – 5,90
95 %	4,20	3,60 – 4,80
90 %	3,05	2,60 – 3,40
80 %	2,05	1,75 – 2,25
60 %	1,15	1,00 – 1,30

Vid dimensionering av anläggningar där syftet är att med stor sannolikhet uppnå en given hydrologisk effektivitet bör värden i övre delen av det troliga intervallet för C_e väljas.

Dimensionerande regndjup för ett buffertmagasin bestäms av magasinets tömningstid:

$$d_r = C_e \left(\sqrt{\tau} - \frac{\tau}{20} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad \text{där} \quad \frac{1}{6} \leq \tau \leq 12$$

och d_r är dimensionerande regndjup [mm]

C_e är en konstant som anger hydrologisk effektivitet

τ är tömningstiden för magasinet [h]

För buffertmagasin med plan botten och konstant infiltration genom hela bottenytan gäller:

$$A_m = \frac{C_e A_r}{d_m} \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right) \quad \text{där} \quad \frac{1}{6} \leq \frac{d_m}{f_c} \leq 12$$

och A_m är magasinets bottenarea [m²]

C_e är den hydrologiska effektivitetskonstanten (1-7)

A_r är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m²]

d_m är magasinets djup [mm]

f_c är infiltrationshastigheten [mm/h]

För öppna buffertmagasin (magasin i vilka regn kan falla rakt ner i magasinet) med plan botten och konstant infiltration genom hela bottenytan gäller även:

$$A_m = \frac{A_h}{\frac{d_m}{C_e \left(\sqrt{\frac{d_m}{f_c}} - \frac{d_m}{20f_c} - \frac{6-C_e}{20} \right)} - 1} \quad \text{där} \quad \frac{1}{6} \leq \frac{d_m}{f_c} \leq 12$$

och A_m är magasinets bottenarea [m²]

A_h är arean på den anslutna hårdgjorda ytan [m²]

d_m är magasinets djup [mm]

C_e är den hydrologiska effektivitetskonstanten (1-7)

f_c är infiltrationshastigheten [mm/h]

För buffertmagasin med en konstant avtappning gäller generellt:

$$V_m = \frac{(1 + \sqrt{1 - 4\alpha\beta} - 2\alpha\beta)\omega}{2\alpha^2}$$

$$\text{där } \frac{1}{6} \leq \frac{V_m}{\omega} \leq 12$$

och V_m är magasinvolymen [m^3]

$$\alpha = \left(\frac{1000\omega}{C_e A_r} + \frac{1}{20} \right)$$

$$\beta = \frac{6 - C_e}{20}$$

ω är avtappningen från magasinet [m^3/h]

C_e är den hydrologiska effektivitetskonstanten (1-7)

A_r är arean på ytan som bidrar med avrinning vid regn [m^2]

Genom insättning av magsinspecifika samband för avtappningen ω i ovanstående uttryck kan specifika dimensioneringssamband härledas för olika typer av magasinskonfigurationer.

För buffertmagasin med en konstant avtappning på f_c millimeter per timme genom ett filter med arean A_f gäller:

$$\omega = \frac{f_c A_f}{1000}$$

där ω är avtappningen från magasinet [m^3/h]

f_c är filterhastigheten [mm/h]

A_f är filterarean [m^2]

För buffertmagasin med en konstant avtappning q_m liter per sekund gäller:

$$\omega = 3,6q_m$$

där ω är avtappningen från magasinet [m^3/h]

q_m är avtappningen från magasinet [l/s]

Tabeller för obuffrade flöden

Det flöde som måste kunna tas omhand för att uppnå en given hydrologisk effektivitet utan hjälp av buffertmagasin redovisas i nedanstående tabell. Tabellen redovisar värden utan hänsyn till rinntid.

Hydrologisk effektivitet	Typiskt erforderligt värde för omhändertagande av obuffrat flöde [l/s/ha]
98 %	90
97 %	64
95 %	40
90 %	18
80 %	8
60 %	4

Den infiltrationskapacitet en genomsläpplig beläggning måste ha för att uppnå en given hydrologisk effektivitet utan hjälp av en buffrande volym på markytan redovisas i nedanstående tabell. Tabellen förutsätter att det endast är nederbörd som faller direkt på den genomsläppliga beläggningen som ska omhändertas.

Hydrologisk effektivitet	Typiskt erforderligt värde på infiltrationskapacitet för genomsläpplig beläggning [mm/h]
98 %	33
97 %	23
95 %	15
90 %	7
80 %	3
60 %	2

Tabellerna för obuffrade flöden redovisar enbart typiska värden baserade på det sammanslagna resultatet från ett flertal orter. Något intervall för spridning i resultaten mellan dessa orter har inte tagits fram. Detta bör beaktas i de fall resultaten ska ligga till grund för dimensionering, så att lämpliga säkerhetsmarginaler läggs på efter behov. Viss säkerhetsmarginal torde dock finnas redan i tabellresultaten eftersom dessa har tagits fram utan hänsyn till rinntid.

Stockholm Vatten och Avfall är en samhällsbyggare i framkant som driver och utvecklar vatten- och avfallstjänster med miljöfokus. Varje dag, året runt förser vi 1,4 miljoner stockholmare med rent och gott kranvatten, renar avloppsvatten och ser till att avfallet tas om hand. Tillsammans med invånare, företag och andra intressenter arbetar vi för att Stockholm ska bli världens mest hållbara stad.



Stockholm Vatten och Avfall

Tel 08-522 120 00

svoa@svoa.se

www.svoa.se

En del av Stockholms stad