



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 22010

Examensarbete 30 hp
April 2022

Modellering av torkstress på vegetation i BlåGrönGråa-system i modelleringsverktyget MIKE SHE

Arvid Backlund

Referat

Modellering av torkstress på vegetation i BlåGrönGråa-system i modelleringsverktyget MIKE SHE

Arvid Backlund

Huvudsyftet med den här studien var att undersöka vilka parametrar som har störst inverkan på trädens vattentillgång i BlåGrönGråa-system (BGG-system), utvecklat av Edge, och vilka förbättring som kan göras för att vegetationen bättre ska klara av torka. Ett annat mål med denna studie var att undersöka hur väl det går att efterlikna och simulera BGG-system i modelleringsverktyget MIKE SHE, utvecklad av Danish Hydraulic Institute (DHI).

För att undersöka vilka parametrar som har störst inverkan på BGG-systems vattenhalt varierades; storleken på tillrinningsområdet, crop factor, växtsubstrat, djup på regnbäddarna, växtval, dräneringsdjup och dräneringshastigheten. Alla simuleringarna genomfördes med meteorologisk data för perioden 1991-2020 för att undersöka hur årsvariationer påverkar vattenhalten i systemet.

Resultaten visar att stadsträd som inte erhåller något tillskott av vatten via tillförsel av dagvatten kommer utsättas för extremt ogynnsamma förhållanden när det kommer till vattentillgång, och att den parameter som har störst inverkan på vattenhalten i BGG-system är storleken på tillrinningsområdet. För att ytterligare förbättra vattentillgången för träden i BGG-system kan växtsubstratet förbättras genom att öka mängden växttillgängligt vatten. Detta föreslås dock framförallt för större träd eller då tillrinningsområdet inte kan utökas ytterligare. Variationen av djupet på regnbäddarna har relativt liten effekt på resultatet, vilket delvis kan förklaras av andra val i satta parametrar. Växtvalet visar sig i denna studie har liten effekt på vattenhalten, vilket delvis beror på modellens utformning och valda parametrar. Variationen av dräneringsdjupet och dräneringshastigheten visar sig inte ha någon effekt på de resultat som undersöks i denna studie.

Modellen som har satts upp beskriver systemet på ett tillförlitligt sätt, och är ett bra första steg för att ytterligare öka förståelsen för trädens förutsättningar i dagvattenhantering. Men för att kunna dra mer långtgående slutsatser om hur träden klarar av torrperioder behöver ytterligare undersökningar genomföras på BGG-system.

Nyckelord: BlåGrönGråa-system, dagvatten, blå-grön dagvattenhantering, stadsträd, torka, MIKE SHE

Abstract

Modeling of drought stress on vegetation in BlueGreenGray-systems in the modeling-tool

MIKE SHE

Arvid Backlund

The main purpose of this study was to investigate which parameters have the greatest impact on the trees' water supply in BlueGreenGray-systems (BGG-system), developed by Edge, and what improvements can be made to the system to make the vegetation able to withstand periods of droughts better. Another aim of this study was to investigate how well it is possible to imitate and simulate BGG-systems in the modeling tool MIKE SHE, developed by the Danish Hydraulic Institute (DHI).

To investigate which parameters have the greatest impact on the water content in BGG-systems the following parameters was varied; the size of the catchment area, crop factor, plant substrate, depth of the rain beds, plant selection, drainage depth and drainage rate. All simulations were performed with meteorological data for the period 1991-2020 to investigate how annual variations affect the water content in the system.

The results show that city trees that do not receive any addition of water via the supply of stormwater will be exposed to extremely unfavorable conditions when it comes to water supply, and that the parameter that has the greatest impact on the water content in BGG-systems is the size of the catchment area. To further improve the water supply for the trees in a BGG-system, the plant substrate can be improved by increasing the amount of plant available water. However, this is mainly proposed for larger sized trees or when the catchment area cannot be expanded further. The variation in the depth of the rain beds has a relatively small effect on the result, which can be partly explained by other choices in set parameters. The choice of plant in this study has little effect on the water content, which is partly due to the model's design and selected parameters. The variation of the drainage depth and the drainage rate does not appear to have any effect on the results examined in this study.

The model that has been set up describes the system in a reliable way, and is a good first step to further increase the understanding of the trees conditions in stormwater management. However, in order to be able to draw more far-reaching conclusions about how trees cope with dry periods, further studies need to be carried out on BGG-systems.

Keywords: BlueGreenGray-system, stormwater, blue-green stormwater management, city trees, drought, MIKE SHE

Förord

Denna master uppsats är det avslutande arbetet på min fem-åriga utbildning i civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik. Detta projekt har genomförts i ett samarbete mellan DHI Sverige och Edge.Handledare för denna master uppsats har varit Kent Fridell, Edge, och Erik Mårtensson, DHI Sverige. Ämnesgranskare har varit Ingrid Wesström, universitetslektor vid institutionen för mark och miljö på Sveriges lantbruksuniversitet.

Jag skulle vilja rikt ett stort tack till min handledare Kent för sitt bidrag med inspiration och vägledning genom hela projektet, och att bidragit med värdefull insikt om de utmaningar vi står inför gällande dagvattenhantering. Jag vill även rikta ett stort tack till min handledare Erik för stöd och hjälp under projektets gång, och för att ha givit mig stor insikt i potentialen med hydrologisk modellering. Jag vill också rikta ett stort tack till Mona Sassner, DHI sverige, för ovärderlig hjälp med modellen under hela projektet. Samt till alla på DHIs Stockholmskontor för en förgylld tillvaro under min tid hos er. Avslutningsvis vill jag även tacka min ämnesgranskare Ingrid för hjälp med rapporten och all uppmuntran under projektet.

Copyright © Arvid Backlund och Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.
UPTEC W 22010, ISSN 1401-5765
Digitalt publicerad i DiVA, 2022, genom institutionen för mark och miljö,
Sveriges lantbruksuniversitet.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Klimatförändringarna innebär att våra samhällen ställs inför en rad nya utmaningar. I ett förändrat klimat förväntas extrema väderevent såsom torka och kraftig nederbörd bli allt vanligare. Detta ställer höga krav på hur vi ska utveckla våra befintliga bostadsområden och hur nya områden ska planeras på ett hållbart sätt. I tätbebyggda områden genereras stora mängder dagvatten vid kraftiga nederbördstillfällena och som, om det inte hanteras på ett effektivt sätt, riskerar att orsaka översvämningar i städer och sprida föroreningar ut i våra sjöar och vattendrag. Det har på senare tid blivit allt vanligare att använda vegetation som en komponent i hanteringen av dagvatten, så kallad BlåGrön dagvattenhantering. Genom att nyttja dagvatten som en resurs snarare än en belastning kan detta vatten användas för att bevattna vegetationen i staden. Detta hjälper till att fördröja dagvattnet lokalt och tillåter samtidigt växter och träd att bidra till att rena detta vatten innan det tar sig vidare ut i vår natur.

BlågrönGrå-system (BGG-system), utvecklat av Edge, är ett sådant system för dagvattenhantering som effektivt kan hantera och fördröja stora mängder dagvatten samtidigt som vegetationen i systemen hjälper till att rena det mest förorenade dagvattnet. Vegetationen bidrar, utöver sitt bidrag till dagvattenhanteringen, med en rad positiva ekosystemtjänster i städerna. Stadsträd bidrar effektivt till att minska temperaturen i städerna, fånga in luftföroreningar från vägtrafiken samt minska buller. Vilka alla har en negativ påverkan på människors hälsa.

Våra stadsmiljöer är dock generellt sett en väldigt ogynnsam miljö för träd att växa i och träd når därmed sällan sin fulla potential. Städer blir ofta varmare och torrare än omkringliggande områden vilket bidrar till att träden ofta utsätts för en påtaglig brist på vatten.

I den här studien har det därför undersökts hur ofta torrperioder och torka har inträffat historisk Uppsala och hur ett framtida klimat i staden förväntas bli för att kunna bättre utforma BGG-system för framtiden. I studien har det även undersökts hur ofta träd i BGG-system utsätts för låga vattenhalter och vilka förändringar i systemen som kan förbättra trädens förutsättningar till en god vattentillgång. För att undersöka detta har en simulering genomförts i en modell uppsatt av Danish Hydraulic Institute (DHI). I modellen har simuleringar genomförts med meteorologisk data från Uppsala för 30-årsperioden 1991-2020. Modellen har utvärderats i avseende på hur väl den lyckas beskriva BGG-system. Resultaten för ett antal olika uppsättningar och utformningar på BGG-system har analyserats för att ta reda på vilka förbättringar som är mest effektiva för att förbättra situationen för träden som planteras i dessa system.

Resultaten i denna studie visar att en blågrön dagvattenhantering är av dubbel glädje för samhället. Träd som inte erhåller något extra vattentillskott kommer utsättas för väldigt ogynnsamma förhållanden när det kommer till dess tillgång på vatten. Det effektivaste sättet för att motverka att träden utsätts för låga vattenhalter är således att aktiva låta regnbäddarna avvattna ett tillräckligt stort område. Redan vid relativt små tillrinningsområden ses en klar förbättring av träden vattentillgång och när storleken på tillrinningsområdet är motsvarande 4-5 gånger så stort som regnbäddarnas yta underskrids aldrig riktigt kritiska nivåer av växttillgängligt vatten under den simulerade 30-årsperioden. Resultaten visar också på en väldigt positiv effekt då mängden växttillgängligt vatten i jorden ökas, vilket kan åstadkommas genom att förändra sammansättningen och materialvalen i växtsubstratet. Detta anses dock först nödvändigt vid plantering av större träd eller då många träd planteras i samma

regnbädd. Ett vanligt mått när det kommer till att dimensionera regnbäddar och växtbäddar, är kvoten mellan jordvolym och trädens kronarea. Resultaten i denna studie visar att en kvot mellan dessa inom intervallet $0,35-0,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ är eftersträvansvärt om tillrinningsområdet är 7 gånger så stort som regnbäddarnas yta. Ytterligare parametrar som undersökt visar sig ha mindre påverkan på resultaten presenteras i denna studie.

Modellen beskriver BGG-systemet på ett trovärdigt sätt utifrån den uppsättning och de förutsättningar som ligger till grund för detta projekt. Modellen är därmed ett bra första steg för att bättre kunna planera och utforma BGG-system, och allmänt öka förståelsen för problematiken och utmaningarna med stadsträd. Dock skulle fler studier behöva genomföras för att kunna ge mer direkta förslag om hur BGG-system ska kunna utgöra en så optimal växtplats som möjligt.

Ordlista

Förkortningar

BGG-system - BlåGrönGrå-system. Ett system för dagvattenhantering som inkorporerar gaturum-
mets olika delar: dagvatten(blå), vegetation(gröna) och hårdgjorda ytor(grå).

DHI - Danish Hydraulic Institute.

RCP - Representative Concentration Pathway

Förklaringar

Dagvatten - Regnvatten och smältvatten som genereras från hårdgjorda ytor i stadsmiljö.

Interception - Process då nederbörd fångas upp av växtligheten och avdunstar, och som därigenom
inte når markytan.

Transpiration - Process då vatten sugas upp av växters rötter, transporteras genom växten och avdun-
star från dess bladyta.

Evapotranspiration - Den samlade avdunstningen som sker genom evaporation och transpiration.

Makadam - Bergskross där det minsta fraktionerna har sållats bort.

Återkomstperiod - Något som återkommer med ett visst givet intervall. Exempelvis ett neder-
bördstillfälle som statistiskt återkommer en gång vart tioende år.

Anisohyrisk - Växttyper med en mer risktagande strategi mot torka.

Isohyrisk - Växttyper med en mindre risktagande strategi mot torka.

Fältkapacitet - Den mängd vatten som återfinns i marken efter att överskottet dränerat bort.

Permanent vissningsgräns - Den minsta mängd vatten som måste återfinnas i marken för att växter
inte ska vissna och dö.

Leaf area index, LAI - Ett mått på mycket bladarea som finns på varje area trädkrona.

Kronprojektion - Den area som finns under trädkronans dropplinje, eller markytan som trädkronan
täcker.

Retentionskurva/vattenbindningskurva - Ett diagram som beskriver hur vattenhalten förändras
med tryckpotentialen.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Syfte och mål	2
1.2	Begränsningar	2
2	Teori och bakgrund	3
2.1	Dagvatten och dagvattenhantering	3
2.2	Nyttan av träd i urbana miljöer	3
2.3	Trädens behov och förutsättningar	5
2.3.1	Träds respons vid torka	5
2.3.2	Känslighet för torka	6
2.3.3	Trädens rotsystem	7
2.3.4	Jordens funktion	7
2.3.5	Trädens vattenbehov	8
2.3.6	Metoder för att uppskatta växtbäddsvolym	9
2.4	Historiska torrperioder och framtida scenarier	12
2.4.1	Historiska torrperioder och torka	13
2.4.2	Uppsalas framtida klimat	15
2.5	BGG-system	17
2.6	Områdesbeskrivning	20
2.7	MIKE SHE	22
2.8	Tidigare studier	23
3	Metod och material	24
3.1	Modelluppsättning	24
3.1.1	Modellinställningar	26
3.1.2	Data och simuleringsperiod	27
3.2	Simuleringar	27
3.2.1	Variation av tillrinningsområde	28
3.2.2	Variation av crop factor	29
3.2.3	Variation av växtsubstrat	29
3.2.4	Variation av djup på regnbädd	30
3.2.5	Variation av växtval	30
3.2.6	Variation av dräneringsdjup	31
3.2.7	Variation av dräneringshastighet	31
3.3	Validering av modellen	32
3.4	Analys av data	32
3.4.1	Gränser av markfuktighet för torka	32
4	Resultat	34
4.1	Tillrinningsområden	34
4.2	Crop factor	37
4.3	Växtsubstrat	40
4.4	Regnbäddsdjup	41

4.5	Växtval	42
4.6	Dräneringsdjup och dräneringshastighet	42
5	Diskussion	44
5.1	Utvärdering av modellen, indata och antaganden	44
5.2	Olika parametrars effekt på BGG-systems motståndskraft mot torka	45
5.3	Hur bör BGG-system dimensioneras i framtiden	48
5.4	Framtida studier	49
5.5	Summering	50
6	Slutsats	52
7	Referenser	53
8	Appendix	58
8.1	Uppsala klimat	58
8.2	Tillrinningsområden	60
8.3	Crop factor	61

1 Introduktion

Klimatförändringarna medför ett stort antal nya utmaningar för vårt samhälle. I framtiden förväntas Sverige uppleva betydligt varmare temperaturer men också mer och intensivare nederbördstillfällen (Gudmundsson & Seneviratne 2016; SMHI 2021a). En av alla dessa utmaningar är hur våra urbana miljöer ska utformas för att klara av att hantera ett förändrat klimat. Befintliga stadsdelar kommer behöva anpassas, samtidigt som nya stadsdelar måste planeras och byggas på ett mer hållbart sätt för att hantera framtida problem. Den ökande och intensivare nederbörden i kombination med att andelen hårdgjorda ytor ökar då städerna växer och förtätas, leder till att mängden dagvatten som ska hanteras också ökar (Di & Chaoqian 2009). Samtidigt kommer de stigande temperaturerna leda till att effekten av urbana värmeöar ökar. Vilket bland annat leder till högre energibehov till nedkylning, försämrad vattenkvalitet samt hälsorisker för befolkningen (US EPA 2021). Detta ställer krav på en dagvattenhantering som både kan fördröja och rena det dagvattnet som genereras och som samtidigt kan bidra med positiva effekter för stadens klimat.

Att kombinera dagvattenhantering och vegetation i gaturummet blir allt vanligare. BlåGrönGrå-system (BGG-system) som utvecklats av Edge är en sådan lösning som effektivt kan hantera stora mängder dagvatten i gaturummet, genom att utnyttja gatans förstärkninglager som ett magasin där dagvattnet kan fördröjas. Systemet kan anläggas med regnbäddar, vegetationsytor eller trädgropar för att ytterligare förhöja de positiva aspekterna av dagvattenhanteringen. Träd som planteras i dagvattensystem hjälper till att rena och fördröja dagvatten, samtidigt som de bidrar med ekosystemtjänster såsom att reducera luftföroreningar, dämpa ljud och buller från vägar samt till att förbättra mikroklimatet och minska effekterna av urbana värmeöar (Klingberg et al. 2017; Susca et al. 2011).

Våra städer och tätorter utgör dock ofta en olämplig miljö för träden som planteras där, och de kommer därför ha sämre förutsättningar att överleva än i dess naturliga ståndort. De hårdgjorda ytorna i staden lagrar och strålar mycket värme, som under varma dagar leder till ett mikroklimat som inte är optimalt för träden. Även vattentillgången orsakar problem för träden. Som en del av dagvattenhanteringen kommer träden både utsättas för vattenmättade förhållanden, vid kraftiga regn, och längre perioder av torka. Hur den urbana vegetationen klarar av dessa längre perioder av torka är dock ett understuderat område (Miller et al. 2020).

I framtiden förväntas Sveriges klimat förändras med ökande temperaturer, längre vegetationsperioder och ökad evapotranspiration (SMHI 2021a). Detta ökar risken för fler potentiella torrperioder som är skadliga för den urbana vegetationen. Brist på vatten är generellt den största orsaken till att träden i urbana områden far illa och sällan når dess fulla kapacitet (Cregg 1995). En anledning till denna problematik är att jordvolymen som träden planteras i ofta är för liten för att hålla en adekvat mängd vatten (Grabosky & Bassuk 1995).

Med BGG-system ges vegetationen ett större utrymme för rotutveckling gentemot konventionella regnbäddar och vegetationsytor, då rötter kan utvecklas ned i det öppna förstärkningslagret. Men utrymmet är fortsatt begränsat och många av de ekosystemtjänster som växtligheten bidrar med riskerar därför att slås ut då de utsätts för längre perioder av vattenunderskott.

1.1 Syfte och mål

Syftet med denna rapport är att undersöka hur ofta träd som planteras i regnbäddar i ett BGG-system utsätts för perioder med vattenunderskott. Detta ska undersökas genom att simulera perioder med historisk väderdata och undersöka vilken effekt olika valda parametrar har på resultaten. Modellen som kommer användas för BGG-system är uppsatt av Danish Hydraulic Institute (DHI) i modelleringsvertyget MIKE SHE. Genom att ge svar på följande frågeställningar är målet för denna rapport att öka förståelsen för under vilka förhållanden som träd stressas av torka, och på så sätt bidra till att utformningen av systemen kan optimeras eller lämpliga åtgärder föreslås för att maximera vegetationens chanser att bidra med de ekosystemtjänster som de tillhandhåller.

- Hur ofta har torka och torrperioder av olika längd under vegetationsperioden återkommit historiskt i Uppsala och hur ser framtiden ut?
- Vilka beräkningsmetoder finns i dagsläget för att mest effektivt dimensionera BGG-systemet?
- Hur väl går det att simulera BGG-system i MIKE SHE?
- Vilka parametrar inverkar mest på BGG-systemets motståndskraft vid torrperioder?
- Vid vilka förhållanden kan stödbevattning behövas?

1.2 Begränsningar

Denna rapport kommer endast fokusera på området runt Uppsala. Således kommer inte några andra regionala väderförhållanden tas i beaktning och resultatet kan därför endast ses som en fingervisning för placeringar i andra lokaler.

Denna undersökningen kommer endast fokusera på hur varierande parametrar inom systemet, och regnbäddarna, kan förbättra förutsättningarna för vegetationen. Därför kommer endast en yttlig utformning av BGG-system studeras och inga förändringar kommer genomföras på modellområdets utformning.

2 Teori och bakgrund

I denna sektion summeras den bakgrund och teori som är nödvändig för att förstå metodiken i denna rapport. Sektionen innehåller information om dagvatten och dagvattenhantering, stadsträd, trädens behov och förutsättningar, BGG-system, torrperioder och torka samt en kortare områdesbeskrivning av Ulleråker där det tänkta BGG-systemet ska anläggas och modelleringsverktyget MIKE SHE.

2.1 Dagvatten och dagvattenhantering

Till dagvatten räknas det regn- och smältvatten som tillfälligt avrinner från hårdgjorda ytor. När en hög andel av marken utgörs av hårdgjorda ytor, som i större städer, då stadsdelar förtätas eller byggs, kommer både intensiteten och volymen av dagvatten att öka. Vilket riskerar att bli ännu värre i framtiden med ökad nederbördsintensitet (SMHI 2021c). En otillräcklig dagvattenhantering i sådana områden leder då till fler översvämningar och att mer föroreningar når ut i våra sjöar och vattendrag.

Fram till och med 1950-talet var det vanligast att dagvattnet hanterades i kombinerade rörsystem tillsammans med spillvatten. Sedan dess har successivt separata system anlagts för hantering av de olika fraktionerna (Thorén 2017). Dagvatten har då ofta letts via stora rör och släppts ut obehandlat i sjöar och vattendrag. Dagvatten sköljer då med sig föroreningar som bidrar till försämrad vattenkvalité i recipienten. Det har därför på senare tid blivit allt vanligare att försöka fördröja och rena vatten så nära källan som möjligt, och därigenom minska utsläppen av föroreningar till vattendragen (Svenskt Vatten 2021). En hållbar dagvattenhantering hämtar inspiration från naturens hantering av regnvatten. Genom att låta dagvattenhanteringen kombineras med stadens växtlighet kan dagvattnet bli till en resurs som långsiktigt bidrar med ekosystemtjänster för ett ökat välbefinnande hos befolkningen (Thorén 2017).

Dagvattensystem dimensioneras idag så att de ska klara av ett omhändertat vattenmängderna som genereras från ett nederbördstillfälle med en viss given återkomstperiod, exempelvis ett 2-årsregn eller ett 10-årsregn (VäxjöKommun 2018). När träd planteras som en del i dagvattenhanteringen tas dock liten hänsyn till återkomstperioden för torrperioder och torka.

2.2 Nyttan av träd i urbana miljöer

Trädens roll i den urbana miljön har förändrats under de senaste decennierna. Stadsträdens funktion har gått från att primärt utgöra en estetisk del i utformningen av gaturummen, till att tillhandahålla en rad sociala, ekonomiska och miljömässiga tjänster för samhället, däribland dagvattensystem (Silvera Seamans 2013).

Urbaniseringen av samhället ger upphov till en ökad andel markareal som utgörs av ogenomsläppliga ytor såsom vägar, hustak och trottoaren. Detta kan leda till att därneringskaraktären i ett avrinningsområde förändras och att ytavrinningen ökar (Di & Chaoqian 2009; Kim et al. 2014). Asfaltsbeksädda vägar reagerar snabbt på den nederbörd som faller och kan avleda så mycket som 50-90% av nederbörden via ytavrinning. Då dagvattnet som bildas på vägarna leds till dagvattenledningar riskerar det att sätta hög press på ledningsnätet vid kraftiga nederbördstillfällen (Armson et al. 2013; Pauleit & Duhme 2000). Att utnyttja träd och vegetation i gaturummen för att hantera dagvatten har blivit allt

vanligare då de på olika sätt kan motverka denna ytavrinning. Via interception kan ett fullvuxet träd hindra i genomsnitt nära 60% av nederbörden från att nå markytan (Guevara-Escobar et al. 2007). Stora och fullvuxna träd är mest effektiva när det gäller interception av nederbörd men även yngre träd har visat sig effektiva och kan motverka mellan 15-22% från att nå marken (T. S. David et al. 2006; Xiao et al. 2000). DeGaetano (2000) och Lindsey & Bassuk (1991) anger en nederbördsmängd på 2,54 mm (0,1 in.) som en gräns som måste överskridas för att nederbörden ska kunna nå till marken och att inte all nederbörd ska fångas upp av trädkronan. Vilket stämmer väl överens med värden för en rad nederbördsmängder givna i Xiao et al. (1998). Hur effektiviteten ser ut varierar och beror bland annat på trädslag, storlek, form på trädkronan samt nederbördens intensitet och varaktighet (T. S. David et al. 2006; Guevara-Escobar et al. 2007; Xiao et al. 2000).

Träd motverkar ytavrinning även till följd av att dagvatten infiltreras ned i växtbädden där träden planteras. Armson et al. (2013) visade att ett träd i en, till ytan 1x1 meter stor, växtgrop reducerar ytavrinningen under ett sommarregn i mycket högre grad än en yta med bara asfalt. För ytan med trädet var ytavrinningen 20% av nederbörden respektive 62% för asfaltsytan. Däremot kunde ingen större skillnad i ytavrinning konstateras, för ytan med trädplanteringen, mellan ett sommar- och vinterregn. Infiltrationen av vatten ned i växtbädden anses därför ha en större inverkan på ytavrinningen än interceptionen från trädet (Armson et al. 2013). Beroende på trädslag och storleken på växtbädden har stadsträd i bland annat USA och Portugal uppskattats reducera ytavrinningen med mellan 3,2-11,3 m³ dagvatten per träd och år (Mullaney et al. 2015).

Stadsträd bidrar även positivt till människors hälsa. Buller och utsläpp från vägtrafik och industrier har en negativ påverkan på människors hälsa. World Health Organization (WHO) uppskattar att 4,2 miljoner människor dör årligen till följd av luftföroreningar från utomhusmiljön, samt att ungefär 99% av jordens befolkning lever i områden där luftkvaliteten överskrider någon av WHO:s gränsvärden (WHO 2021). I en amerikansk studie baserad på data från 1990-2007 visade att antalet dödsfall till följd av kardiovaskulära sjukdomar och sjukdomar i de nedre luftvägarna ökade i områden där träd blivit angripa av skadedjur. Dessa sjukdomar är starkt kopplade till bland annat dålig luftkvalité (Donovan et al. 2013). Träd kan vara särskilt effektiva när det kommer till att minska ljudnivåer och att fånga in och lagra luftföroreningar. Några av dessa luftföroreningar inkluderar koldioxid (CO₂), kolmonoxid (CO), ozon (O₃), kväve- och svaveloxider (NO_x, SO_x) samt PM10-partiklar (Mullaney et al. 2015). Det har uppskattats att stora och friska träd kan avlägsna mellan 60 och 70 gånger så mycket luftföroreningar som mindre träd (McPherson et al. 1994). Träd samlar även in och binder kol, vilket bidrar till att minska växthusgaser i atmosfären. I en svensk studie genomförd över 9 svenska städer, i modellverktyget i-Tree, beräknades upptaget av koldioxid i medeltal till 34,6 kg/träd och år (Deak Sjöman & Östberg 2020). För att sätta det i kontext uppskattade Moore (2009) att stadsträden (~ 100 000 träd) i Melbourne, Australien, hade fångat in och lagrat en miljon ton koldioxid sedan de planterades. För SO₂ och NO är motsvarande siffror i medeltal 9,4 respektive 38 g/träd & år (Deak Sjöman & Östberg 2020). Majoriteten av luftföroreningarna som träden tar upp fångas in via klyvöppningarna på bladen, medan upptag av luftburna partiklar kan ske av alla trädets delar (Nowak et al. 2006).

Urbana värmeöar är en effekt av hur våra städer är uppbyggda och leder till att temperaturen generellt är högre i städer och tätorter än i de omkringliggande områdena. Stadsträd kan effektivt bidra till att motverka effekten av urbana värmeöar och sänka temperaturen i städerna. Höga temperaturer har en negativ effekt på människors hälsa och då framförallt på barn och äldre vuxna. Mellan år 2004 och

2018 rapporterades 10527 dödsfall i USA där höga temperaturer var antingen en underliggande eller bidragande faktor (US EPA 2021). Hur stor den kylande effekten blir beror till stor del på trädens storlek, kronareans storlek och densiteten av vegetationen, då så mycket som 80% av den kylande effekten kommer från den skugga som träden bidrar med (Mullaney et al. 2015). Temperaturskillnader på 1-8°C är inte ovanligt mellan områden med och utan planterade träd (Killicoat et al. 2002), men i exceptionella fall har temperaturskillnader på uppemot 20°C observerats i Kalifornien, USA (Myrup et al. 1993).

Det ekonomiska värde som stadsträd bidrar med är relativt svårt att fastställa, då kostnaderna för exempelvis dagvattenhantering eller de energibesparingar som träd bidrar med varierar kraftigt mellan städer och länder. Mullaney et al. (2015) har i en översiktstudie konstaterat att nettobesparingen som stadträden bidrar med uppgår till mellan 21-159 US\$ per träd, men att de i de flesta fall rör sig om besparingar i storleken 50 US\$. Deak Sjöman & Östberg (2020) anger att värdet av trädens koldioxidupptaget i bara Kristianstad (~17000 träd) uppgår till 922000 kr årligen eller ungefär 54 kr/träd.

2.3 Trädens behov och förutsättningar

Trots alla de ekosystemtjänster som stadsträd bidrar med är den urbana miljön en plats där de utsätts för en rad olika stressfaktorer. Dessa stressfaktorer kan delas in i biotiska och abiotiska påfrestningar. Till biotiska påfrestningar hör angrepp av sjukdomar och skadedjur, medan abiotiska påfrestningar är nära relaterade till trädens tillväxtmiljö och innefattar faktorer som otillräckligt solljus, luftföroreningar, syrebrist, jordkompaktering, extremtemperaturer, salttillförsel och trädbeskärning (Sæbø et al. 2005). Generellt är det dock bristen på vatten som är den störst bidragande faktorn till trädens hämmade tillväxt (Cregg 1995; A. A. J. David et al. 2018; Vico et al. 2014). Vattenbristen som stadträden utsätts för beror ofta på att markvolymen som träden planteras i är alldeles för liten och att marken är för hårt kompakterad, vilket är en följd av att träden konkurrerar med en rad andra samhällsfunktioner i gaturummen (Grabosky & Bassuk 1995). Vattenbristen har en rad negativa effekter på träden vilket gör att de upplever förhållanden som ofta stressar trädets hälsa och tillväxt. Detta gör att träd i gaturummet kan uppvisa en storlek motsvarande ett 40 år yngre träd som växt i mer naturliga miljöer och att de sällan når sin fulla potential (A. A. J. David et al. 2018).

2.3.1 Träds respons vid torka

Träd har ett antal olika responser att tillgå när de utsätts för vattenbrist. Men i vilket utsträckning detta sker beror på om träden är anisohydriska eller isohydriska. Anisohydriska arter tenderar att fortsätta transpirera i högre utsträckning även när mängden vatten minskar medan isohydriska växter sluter sina klyvöppningar redan vid tidiga täcken på torka. Anisohydriska arter har därigenom en mer risktagande strategi där produktionen av biomassa bibehålls längre under torra perioder (Lizell 2021). Det som händer när ett träd utsätts för vattenbrist är att rötterna känner av detta och börjar producera hormonet abscisinsyra, som skickas vidare till bladen. Hormonet får bladen att sluta eller helt stänga sina klyvöppningar för att på så sätt minska trädets vattenförbrukningen. Hormonet hämmar även tillväxten ovan jord vilket gör att nya blad blir mindre och avståndet mellan de nya bladen minskar, samtidigt som mer resurser allokeras till att bilda nya rötter (Coder & Warnell 1999; Ericsson 2009). Om vattenbristen fortsätter att förvärras ytterligare kommer trädet tvingas minska sin bladyta för att ytterligare

minska vattenförbrukningen. Det gör de genom att offra de äldsta bladen, vilket sker genom att löven antingen faller av direkt eller först gulnar innan de faller av (Coder & Warnell 1999; Ericsson 2009). Alla dessa vattenbesparade responser har en vidare effekt på trädets fotosyntes. Vid kortare perioder av torka hämmas först fotosyntesen då bladen får svårare att ta upp koldioxid när klyvöppningarna sluts, innan den helt upphör ifall vattenbristen fortskrider. Fotosyntesen återhämtar sig långsamt men återgår ofta till normal funktion när vatten återigen blir tillgängligt för trädets rötter, men trädet kan i vissa fall bli permanent skadat av långvarig torka (Coder & Warnell 1999). Via fotosyntesen bildas glukos som trädet sedan förbrukar vid cellandning. När fotosyntesen hämmas vid torrperioder och cellandningen fortsätter opåverkat kommer trädet tvingas utnyttja sina glukosreserver. Fotosyntesens långa återhämtningstid efter torka kommer därigenom påverka trädet glukosreserver under längre tid än torkan pågår. Detta kan leda till brist på glukos till att försörja andra vitala funktioner, såsom försvarsmekanismer, vilket försämrar trädets vitalitet. Vilket leder till att dessa träd lider en förhöjd risk att drabbas av sjukdomar och angrepp från skadedjur (Coder & Warnell 1999).

2.3.2 Känslighet för torka

Trädarter är olika känsliga för torka och torrperioder, ofta beroende på vart de ursprungligen kommer ifrån (Ryan 2011). Trädarter som återfinns i torra regioner har utvecklat ett antal strategier för att bättre hantera den bristande tillgängligheten på vatten. Bland dessa återfinns djupgående finrotsystem, djupa pålrötter med möjlighet att lagra vatten samt blad anpassade för varma och soliga klimat. Dessa blad har ofta en hög andel biomassa per areaenhet och tjocka cellväggar vilket gör att de klarar av högre negativt vattentryck(turgortryck) i bladet innan de vissnar (Lizell 2021). Att välja träd som kommer klara av stadernas torra mikroklimat är svårt då vissa av dessa strategier, som djupa rotsystem, är svåra att utnyttja i en stadsmiljö med hårtkompakterade jordar. Det blir ännu svårare då även relativt närbesläktade arter har påvisats med varierande känslighet och respons till torka. Larchevêque et al. (2011) jämförde responsen mellan plantor av två poppelhybrider, båda med *P. balsamifera* som förälder, och plantor av *P. balsamifera* när trädplantorna utsattes för simulerade torrperioder. Resultatet visar att alla de tre klonerna hade olika responser för att hantera den torka som simulerades. De olika plantorna uppvisade varierande grad av lövfällning, rot- och stamtillväxt samt skillnader i effektivisering av vattenförbrukningen. Attia et al. (2015) utförde en liknande studie och kom fram till liknande resultat. Gemensamt för många träd är att de tenderar att omfördela sina resurser när vattentillgången minskar. Istället för att växa ovan jord fokuseras tillväxten till rötterna för att öka möjligheten att absorbera vatten ur större mängd jord (Coder & Warnell 1999; Larchevêque et al. 2011). Träd som anses torktåliga har en särskilt stor mängd rötter, och fokuserar då ofta på att producera mycket finrötter. Detta gör att de når ut i en större jordvolym per producerad rotmassa. Hur mycket rottillväxten ökar varierar väldigt mycket och även om rottillväxten tenderar att öka har studier visat att rotbiomassan inte förändras lika mycket. Detta tycks bero på att en del av rötterna(ofta finrötter) självdör till förmån för ny tillväxt av rötter som har bättre möjlighet till upptag av vatten (Brunner et al. 2015). Denna rotdödlighet kan skapa långvariga problem och göra trädet känsligare för torka efterföljande år (Anderegg et al. 2013).

2.3.3 Trädens rotsystem

Trädens rotsystem är komplexa och rottillväxten sker endast där yttre faktorer är gynnsamma. Den stora majoriteten av rotbiomassan återfinns oftast i jordens översta 60 cm, där jorden är minst kompakt och vatten-, syre- och näringstillgången är mest tillgänglig (Dobson 1995). Schenk & Jackson (2002) har i en omfattande studie studerat rotdjup, för alla växter i rotprofilen, i förhållande till olika klimatzoner och vegetationstyper. Rotdjupet från 475 markprofiler spridda över världens klimatzoner studerades och resultatet visar att oavsett klimatzon och vegetationstyp återfinns 50% av rotbiomassan i jorden översta 30 cm och att djupet för 95% av rotbiomassan hade ett medeltal på 102 cm. Resultatet visar också att rotdjupet minskar med ökad latitud, vilket antas bero på lägre temperaturer, kortare växtsäsong och mindre avdunstningsbehov. Vilket stöds av att de största rotdjupen återfinns i väldigt torra områden, där träd och växter behöver söka vatten långt ned i markprofilen. För de klimattyper som studerats och som återfinns i Sverige, boreal-, kalltempererad-, varmttempererad-skog, återfinns 95% av rotbiomassan i jorden översta 85 cm (Schenk & Jackson 2002). De djupaste rötterna återfinns oftast rakt under eller nära trädets stam. Men de flesta rötterna sprider istället ut sig horisontellt från stammen allt eftersom trädet växer och kan nå avstånd från stammen motsvarande trädets höjd (Dobson 1995). Detta är speciellt vanligt för träd som växer i urbana miljöer, då de har svårt att penetrera ned i kompakta jordar. Många träd har visat sig haft minskad rottillväxt och till följd begränsad tillväxt ovan jord då jordens bulkdensitet överskrider $1,5 \text{ g/cm}^3$ (Bühler et al. 2007).

2.3.4 Jordens funktion

Jordens eller växtbäddens struktur är avgörande för trädets vitalitet. Jordens porer är det system som tillhandahåller trädets rötter med utrymme för tillväxt, vatten och ett adekvat gasutbyte. Porerne kan delas upp i tre klasser. De porer som är större än 0,03 mm kallas makroporer, mellan 0,03-0,0002 mm benämns mesoporer och microporer är de porer som är mindre än 0,0002 mm. När alla porerna i marken är vattenfyllda har marken nått sin maximala vattenkapacitet. Efter ett tag kommer vattnet i makroporerne dräneras bort då porerna är för stora för att kunna hålla kvar vattnet, marken ha då nått sin fältkapacitet (Sjöman & Slagstedt 2015). När jorden når fältkapacitet är ungefär 60-80% av porerna fyllda med vatten, medan 20-40% är luftfyllda (Väderstad 2021). Hela denna mängd vatten är dock inte tillgängligt för växtligheten. Det växttillgängliga vattnet ges som skillnaden mellan fältkapacitet och den permanenta vissningsgränsen och varierar mellan olika jordarter. Den permanenta vissningsgränsen inträffar när växtens rötter inte längre klarar av att suga upp vattnet ur markens porer, vilket teoretiskt sker när det vattenavförande trycket överskrider -150 meter vattenpelare(mvp). Vid detta tryck återfinns vatten endast i microporerne (Sjöman & Slagstedt 2015). Hur mycket växttillgängligt vatten en jord kan magasinera beror på jordarten. En sandig jord kan hålla relativt lite vatten, men nästan allt är tillgängligt för växterna. Medan en jord med styv lera kan hålla väldigt stora mängder vatten, men nära 50% av det vattnet kan vara för hårt bundet för att vara tillgängligt för växterna (Sjöman & Slagstedt 2015). I en växtbädd vill man således ha en jord som har en stor andel mesoporer som kan hålla mycket växttillgängligt vatten.

2.3.5 Trädens vattenbehov

Träd förbrukar vatten till ett antal vitala funktioner såsom näringsupptag, fotosyntes, mineral- och sockertransport och för att ge stadga i cellerna. Det är dock bara 1-2% av vattnet som används för att tillgodose dessa behov, resterande del avges via transpiration från trädens blad och barr (Ball 2021; Ericsson 2009). Lindsey & Bassuk (1992) studerade den verkliga avdunstning (transpirationen) från fyra olika trädslag relaterat till avdunstningen från en öppen vattenyta i ett försök att specificera en adekvat växtbäddsvolym för stadsträd. Resultatet visade på små skillnader i transpirationen mellan de olika trädslagen och att den för alla trädslag, under optimala förhållanden, motsvarar ungefär 30% av avdunstningen från en öppen vattenyta. Bladarean för de olika träden i studien varierade mellan 5-46 cm² men hade enligt resultaten ingen större inverkan på transpirationen. Istället visar studien att den främst bidragande faktorn till trädens vattenförbrukning är storleken på trädkronan.

Lindsey & Bassuk (1992) har tagit fram en formeln som ofta används för att beräkna ett trädets vattenförbrukning, se ekvation 1. Genom att ha kunskap om relationen mellan trädets kronprojektion (KP) och Leaf Area Index (LAI) samt med information om den potentiella avdunstningen kan trädets dagliga vattenförbrukning (DVF) uppskattas. Kronprojektion avser arean under ett trädets dropplinje och beräknas oftast som arean för en cirkel. LAI är en beskrivning av hur stor den samlade lövarean för ett specifikt träd är i relation till arean av trädkronan. Exempelvis så säger ett LAI på 3 att det för varje kvadratmeter kronarea finns 3 kvadratmeter lövarea. Indexet varierar mellan 1 och 12 men ett värde på 4 kan ses som ett relevant maximum då värden över detta höjer trädkronans interna luftfuktighet som i sin tur motverkar ytterligare avdunstningshöjning (Ericsson 2009). För pelarformiga träd är dock en höjning till 5-6 relevant på grund av trädkronans utformning. Avdunstningsfaktorn, k , tar i beaktning den verkliga avdunstningen i relation till den potentiella avdunstningen. Lindsey & Bassuk (1992) fastställde under optimala transpirationsförutsättningar denna faktor till 0,3. Samma studie visar samtidigt att den verkliga avdunstningen minskar med ökad storlek på trädkronan och redan för trädkronor > 1,2 m² så är avdunstningsfaktor nere på 20% av den verkliga avdunstningen och att den skulle det kunna minska ytterligare för ännu större träd då den interna lövskuggningen ökar (Lindsey & Bassuk 1992).

$$\text{Daglig vattenförbrukning [m}^3\text{/dag]} = \text{KP [m}^2\text{]} \cdot \text{LAI [m}^2\text{/m}^2\text{]} \cdot \text{PE [m/dag]} \cdot k \quad (1)$$

Genom beräkningar med ekvation 1 har Ericsson (2009) sammanställt vattenförbrukningen för 10 olika trädslag med varierande kronstorlek. Vattenförbrukningen för ett urval av dessa träd redovisas i Tabell 1. Dessa beräkningar är uppskattade utifrån den maximala storleken träden teoretiskt kan uppnå, en storlek vilken stadsträd sällan når. Träd som planteras i växtgropar eller vegetationsytor når sällan en storlek över 75-80% av dess teoretiskt maximala storlek, vilket ofta beror på växtbäddens begränsade utrymme (A. A. J. David et al. 2018; Sanders et al. 2013). Det betyder däremot inte att den begränsade tillväxten per automatik stressar träden till en kortare livslängd (Quigley 2004).

Tabell 1: Vattenförbrukning för olika trädarter. Beräkningar utförda av Ericsson (2009).

Trädart	Kronradie [m]	Vattenförbrukning [l/dag]
Oxel	3	107
Björk	3,5	146
Fågelbär	4	198
Lönn	6	428
Skoglind	7,5	669
Hästkastanj	10	1189
Ek	12,5	1857

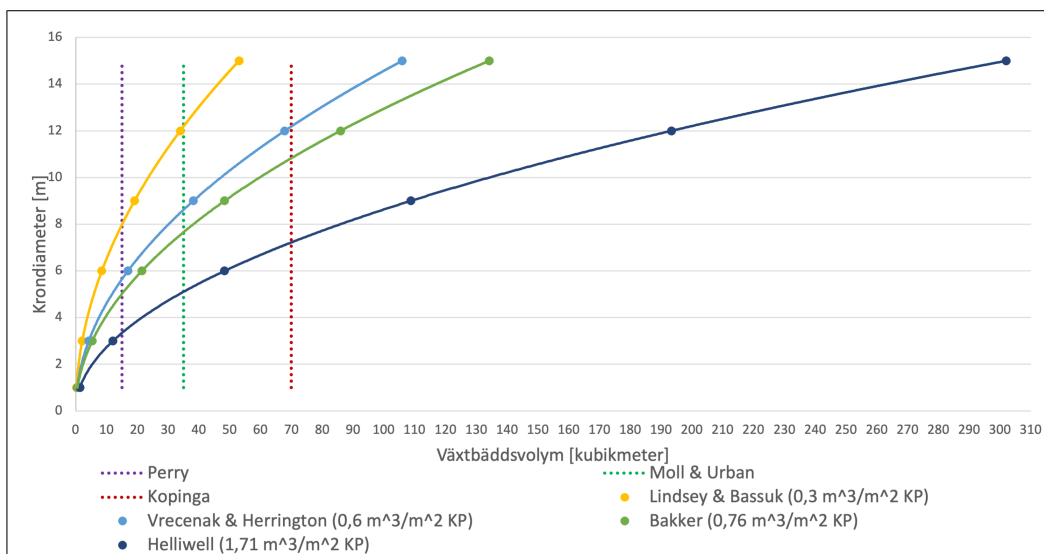
Det finns inga raka svar på hur lång tid ett givet träd kan gå utan tillgång på vatten. Tidigare studier har föreslagit att en vattenhalt på minst 75% av det maximalt växttillgängliga vattnet bör eftersträvas för att trädens optimala hälsa och estetiska kvalitéer ska upprätthållas (DeGaetano 2000; Lindsey & Bassuk 1992).

2.3.6 Metoder för att uppskatta växtbäddsvolym

Detta avsnitt är till för att besvara den andra frågeställningen; vilka beräkningsmetoder finns i dagsläget för att mest effektivt dimensionera BGG-systemet?

Hur stor volym jord ett träd behöver varierar med trädslag och storleken på trädet men generellt gäller att en så stor växtbädd som möjligt alltid är det bästa alternativet då trädens rötter upptar ett mycket större område än trädkronan om utrymmet ges. I en urban miljö med begränsat utrymme finns inte alltid möjligheten att anlägga växtbäddar som är så stora. Det har därför gjorts en del försök för att uppskatta växtbäddsvolymer som tillgodoser träden med adekvat utrymme.

Lindsey & Bassuk (1992) har sammanställt ett antal studier som har kommit med förslag på vad som anses vara adekvata växtbäddsvolymer för ett enskilt träd, se figur 1. Vrecenak & Herringtons samt Helliwells resultat har omtolkats av författarna för att relatera till kronprojektion. Förslagen har framarbetats med olika metoder och bygger på olika faktorer som är av relevans för trädens vitalitet, medan vissa förslag närmast kan ses som tumregler att förhålla sig till. Resultaten visar att det finns en stor variation mellan vad som anses som en lämplig växtbäddsvolym. Men också att det beroende på vilket faktor, för trädens vitalitet, som studeras blir stor variation i resultaten. Det är även tydligt att många av förslagen i Figur 1 snabbt blir väldigt stora och därmed orealistiska att genomföra i ett gaturum där växtbädden kommer konkurrerar med andra samhällsviktiga funktioner.



Figur 1: Ett antal rekommenderade storlekar på växtbäddar. Streckade linjer anger minsta storlek för fullvuxna träd. Helt dragna linjer är uppskattningar baserade på förväntad kron diameter. Resultat hämtade från Lindsey & Bassuk (1992).

Det kanske enklaste sättet att uppskatta en adekvat storlek på en växtbädd är att det krävs $0,6 \text{ m}^3$ jordvolym per m^2 kronprojektion, se ekvation 2. Detta värde bygger på resultat från ett antal tidigare studier, bland annat Moll och Urban, Lindsey och Bassuk samt Vrecenak och Herrington som visas i Figur 1, där en lämplig jordvolym har försökt uppskattats med avseende på olika faktorer som är av relevans för att trädens vitalitet. Detta beräkningsätt är framtaget för träd av "normal" form, och tenderar därigenom att underskatta volymen för träd av pelarform samt överskatta volymen för träd med väldigt breda trädkronor (GreenBlueUrban 2021; TreesImpactGroup 2017).

$$\text{Volym växtbädd [m}^3] = 0,6 \text{ [m]} \cdot \text{Kronprojektion [m}^2] \quad (2)$$

En beräkningsmetod som tillåter beräkning av lämpliga jordvolym, i överensstämmelse med de som återfinns i litteraturen, men som kompenserar för variationer av trädets form ges i ekvation 3. I denna metod utnyttjas endast information om trädets höjd (TH) i meter och trädets diameter i brösthöjd (DBH) i millimeter vid fullvuxen storlek. Uppskattningar om trädets höjd är relativt lätt att finna via plantskolors hemsidor, medan information om trädets DBH, som mäts ungefär 130 cm ovan markytan, kan vara mer svårinförskaffad. Generellt kan DBH därför uppskattas till ungefär 4% av trädets höjd för de flesta träd. För träd med väldigt grov eller smal stam justeras denna procent till 5,5% respektive 2,5% av trädets höjd (TreesImpactGroup 2017).

$$\text{Volym växtbädd [m}^3] = \frac{\text{TH [m]} \cdot \text{DBH [mm]}}{100} \quad (3)$$

Lindsey & Bassuk (1991) tog fram ett sätt att beräkna en adekvat jordvolym genom att fokusera på trädens vattenbehov. Trädens dagliga vattenförbrukning beräknas som tidigare nämnts enligt ekvation 1. Lindsey & Bassuk (1991) anger att det krävs minst 2,54 mm nederbörd för att växtbädden ska kunna tillgodogöra sig nederbörden och återfylla jordens porer med vatten. Författarna konstaterar att för området där studien utfördes, Ithaca, New York, så är intervallet mellan sådana nederbördsintervall kortare än 10 dagar i 92% av fallen. Beräkningsmetoden Lindsey & Bassuk (1991) tagit fram kräver kunskap om den mängd växttillgängligt vatten (VTV) som jorden kan hålla, nederbördsfrekvensen (NF), dvs det intervallet mellan en given nederbördsmängd, samt den dagliga vattenförbrukningen (DVF), se ekvation 4. Denna metod är välbeprövad och går att anpassa till det klimat som råder där växtbädden planeras. Några svagheter i beräkningen är antagandet om att växtbädden kommer återfyllas helt av enbart nederbörd vid ett givet intervall, vilket inte alltid är fallet, samt användandet av medelvärde på evapotranspirationen.

$$\text{Volym växtbädd [m}^3\text{]} = \frac{\text{DVF [m}^3\text{/dag]} \cdot \text{NF [dagar]}}{\text{VTV [m}^3\text{/m}^3\text{]}} \quad (4)$$

DeGaetano (2000) utvecklade en metod för att beräkna hur stor växtbäddsvolym ett träd behöver för att inte utsättas för vattenbrist under en given återkomstperiod. Han utvecklade *Lindsey & Bassuks* beräkning och genomförde i sin studie simuleringar med klimatdata för att se hur ofta träd utsätts för vattenbrist under en viss tidsperiod. I sin modell har DeGaetano tagit hänsyn till att trädens dagliga vattenförbrukning avtar med minskad markfuktighet och har därför lagt till en justeringsfaktor till ekvation 1 i sin modell. Denna justeringsfaktor beror av det växttillgängliga vattnet som återfinns i jorden varje enskild dag. DeGaetano (2000) ansätter 10% av det växttillgängliga vattnet som gräns för då marken anses så uttorkad att det skadar trädet, men medger att träden kan ta skada innan denna gräns. Resultatet visar då att en växtbädd, som enligt Lindsey & Bassuk (1991) beräkningsmätt skulle klara 12 dagar utan vattentillskott, torkar ut fem gånger under en 10-årsperiod, vilket då motsvarar en återkomstperiod på 2 år.

I studien undersöktes även vilken volym växtbädden behöver ha för att den endast ska torka ut en gång under en given tidsperiod, resultatet kan ses i tabell 2. Resultaten kommer utifrån simuleringar gjorda med meteorologisk data från Boston, Massachusetts, USA. Simuleringarna bygger på att endast ett träd återfinns i växtbädden och det har heller inte tagits hänsyn till eventuell ytavrinning som leds till växtbädden, utan växtbädden tillskaffas vatten enbart genom nederbörd. I simuleringarna har mängden växttillgängligt vatten antagits motsvara 15% av växtbäddens volym (DeGaetano 2000). Resultaten visar att en kvot mellan volymen växtbädd och trädets kronprojektion på ungefär $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$, resulterar i att växtbädden kommer torka ut i genomsnitt vartannat år. Men bara genom att öka denna kvot till ungefär $0,33 \text{ m}^3/\text{m}^2$ så ökas återkomstperioden till 50 år.

Tabell 2: Växtbäddsvolymer i m³ för olika stora träd för given återkomstperiod då växtbädden torkar ut utan bevattning. De redovisade värdena i tabellen är resultat hämtade ifrån DeGaetano (2000)

Kron diameter [m]	Volym för given återkomstperiod [m ³]				
	2 år	5 år	10 år	25 år	50 år
2	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8
4	2,5	3,1	3,6	3,9	4,2
6	5,4	7,1	8,0	8,8	9,3
8	9,6	12,5	14,1	15,6	16,5

2.4 Historiska torrperioder och framtida scenarier

I detta avsnitt ges en beskrivning av historisk och framtida torka med övergripande fokus på Uppsala och Uppsala län. Informationen är till för att besvara frågeställningen; Hur ofta har torka och torrperioder av olika längd under vegetationsperioden återkommit historiskt i Uppsala och hur ser framtiden ut?

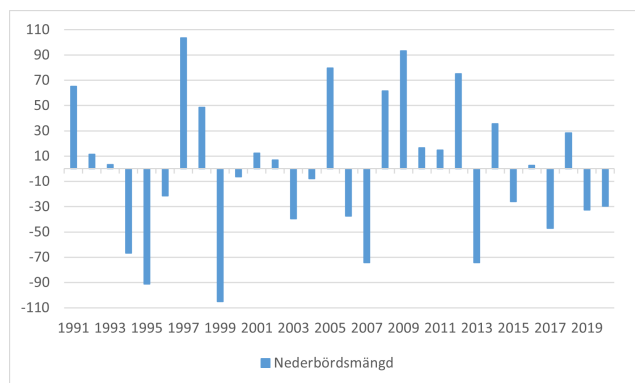
Torka uppstår under längre perioder av lite nederbörd och leder till brist på vatten både i naturen och för mänskliga behov. Enligt National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA (2021), finns det fyra olika definitioner av torka, vilka är meteorologisk, hydrologisk, jordbruks samt socioekonomisk torka. Meteorologisk torka uppkommer när torra vädermönster dominerar ett område, och kan starta och sluta väldigt abrupt. Hydrologisk torka uppstår ofta efter längre perioder av meteorologisk torka, detta visar sig då som låg vattentillgång i framförallt sjöar och vattendrag. Jordbrukstorka inträffar då vattenbristen blir påtaglig för jordbruket och socioekonomisk då mänskliga behov, som dricksvattenproduktion eller vattenkraftsproduktion påverkas (NOAA 2021). SMHI använder fem olika begrepp för att beskriva torka. Utöver de typer som även NOAA använder sig av återfinns även ekologisk torka i SMHIs beskrivningar. Ekologisk torka sker då vattenunderskottet driver ekosystem över kritiska tröskelvärden eller rubbar ekosystemens balans. Dessa längre perioder av lite nederbörd leder då bland annat till låga grundvattennivåer, låga vattenflöden och låg markfuktighet. Torrperioder, eller meteorologisk torka, definieras enligt SMHI som sammanhängande dagar utan mätbar (<0,1 mm) nederbörd (SMHI 2019).

Detta projekt kommer utgå ifrån SMHIs definitioner av torka, men kommer i fortsättningen hänvisa till torrperioder i de fall som avser meteorologisk torka och hänvisa till torka för de avseenden som faller inom de andra mer långtgående begreppen av torka. Det är inom ramen för detta projekt viktigt att göra skillnad på begreppen torka och torrperiod. Vegetationen i BGG-system har i detta projekt ett begränsat mått på dess rotutbredning och ingen möjlighet att utveckla rötter som skulle kunna nå grundvattnet för att understödja dess vattenbehov, vilket kan göra de känsligare för torrperioder än vegetationen i naturliga miljöer. Dock kan det vara så att träden i BGG-system har bättre möjlighet till återhämtning vid kortare skurar och mindre regn, då denna vattenmängd aktivt styrs till systemet, vilket skulle göra dem mindre känsliga än träd i naturliga miljöer vid längre perioder av torka.

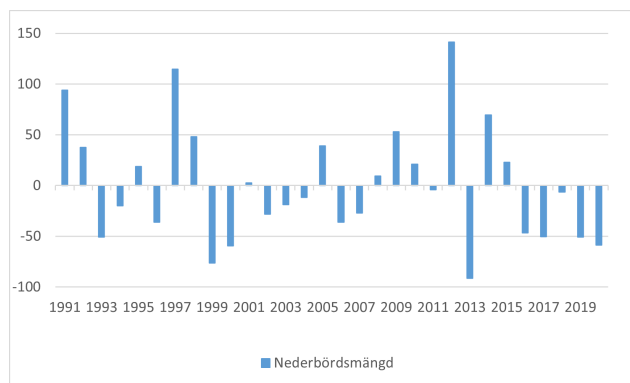
2.4.1 Historiska torrperioder och torka

Hur ofta torrperioder av en viss längd återkommer har fått lite uppmärksamhet inom forskningen. Sverige är i ett internationellt perspektiv relativt förskonade mot kraftig torka och det har pågått en trend med mer nederbörd sedan 1900-talets början och som blivit tydligare sedan 1950-talet och beror framförallt på ökad nederbörd under vinterhalvåret. I Uppland och Södermanland visar sig trenden har vänt något sedan 1980-talet då mängden nederbörd har minskat eller stagnerat (Chen et al. 2020). I en studie, utförd över den då senaste 100-årsperioden, konstaterade Eriksson (1986) att både blöta och torra somrar (juni-augusti) ofta återkommer efter varandra. Vilket också kan ses i SMHI (2003) faktablad om torka, där det anges att medelvärdet för sommarnederbörden (juni-augusti) i hela Sverige mellan 1900-2002 uppgick till 209 mm när data från 87 spridda stationer studerades. Under den studerade perioden har sommarnederbörden underskridit 150 mm vid nio tillfällen och anses vara ovanligt torra somrar (SMHI 2003). Sedan år 2002 har 4 år stuckit ut som ovanligt torra, 2003 samt 2016-2018 (SMHI 2021b).

Det kan dock vara missvisande att studera medelnederbörd över stora områden. Sommaren 1992 redovisas vara mer nederbördsrik än normalt för hela Sverige i SMHI (2003), medan sydöstra Sverige upplevde en unikt lång torrperiod som varade mellan 13 maj och 11 juli (SMHI 2021b). Eriksson (1986) redovisar skillnader på 20 mm i nederbörd under den torraste sommarperioden (jun-aug) för mätstationerna i Uppsala och Ultuna, placerade ungefär 6 km ifrån varandra och under en av de blöteste sommarperioderna är skillnaden så stor som 56 mm för de olika stationerna. Medelnederbörden i Uppsala har under den senaste referensperioden (1991-2020) uppgått till 192,3 mm för sommarmånaderna (juni-aug) och 312 mm för hela vegetationsperioden (april-sep), se Tabell 12 & 13 i Appendix. För sommarmånaderna utmärker sig åren 1994, 1995, 1999, 2007 och 2013 som väldigt torra och även 2017 var torrt, se Figur 2a. Sommaren 2018 sticker ut då nederbörden för både sommaren och vegetationsperioden är över medelvärdet för de båda perioderna trots att det mellan 1:a maj och 28:e endast föll 48,7 mm regn. Studeras hela vegetationsperioden ses att åren 1999, 2000, 2013 och 2020 är torra, se Figur 2b.



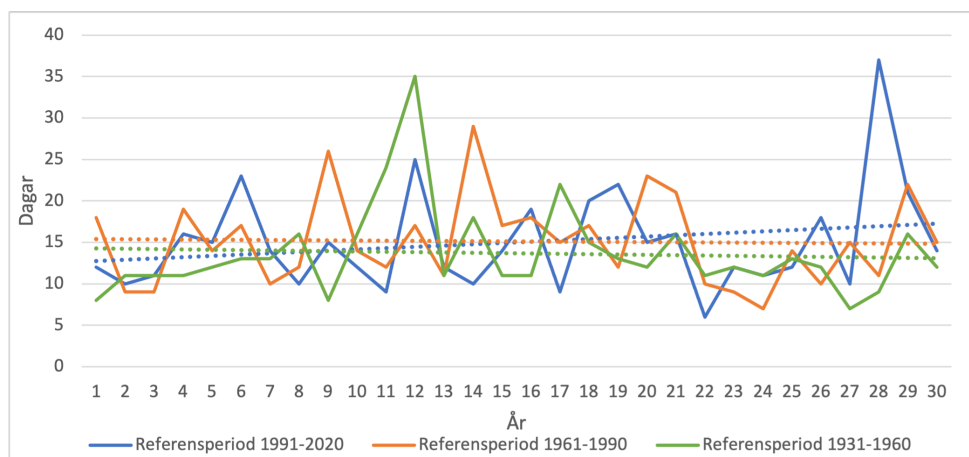
(a) Sommarperioden (juni-augusti)



(b) Vegetationsperioden (april-september)

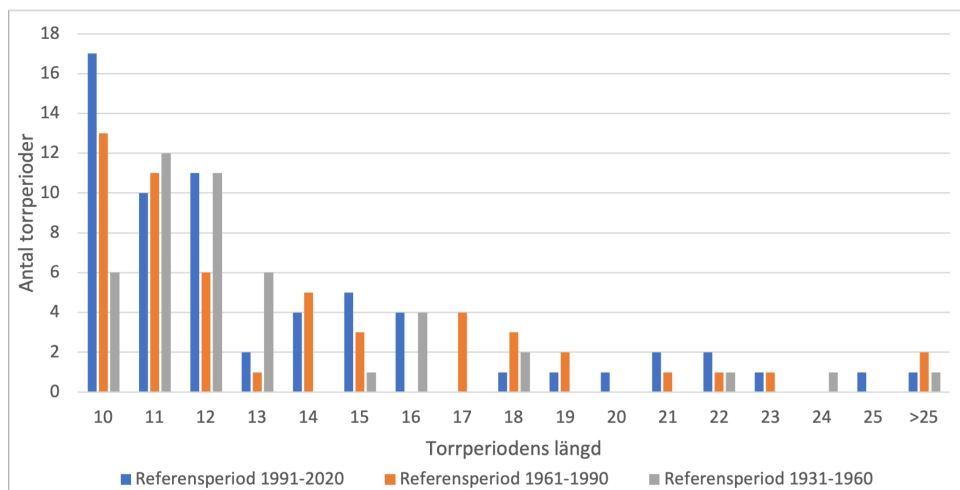
Figur 2: Nederbördsvariation från medelvärdet för sommarperioden och vegetationsperioden under perioden 1991-2020 för Uppsala. Sammanställning av data hämtade för mätstation Uppsala Aut (SMHI 2021c).

Uppsalas längsta torrperiod, under vegetationsperioden, för de tre senaste normalperioderna, 1931-1960, 1961-1990 och 1991-2020, har i genomsnitt varit 13,6, 15,1 och 15 dagar lång. Längden på torrperioderna varierar relativt kraftigt mellan åren, däremot har den längsta torrperioden (period utan mätbar nederbörd) varit nära eller över 30 dagar lång för var och en av de tre normalperioderna, se Figur 3. Trendlinjerna för de tre referensperioderna ges av de streckade linjerna i Figur 3, för de två tidiga perioderna så har dessa en svagt negativ lutning. För den senaste perioden så ses en liten ökande trend för den längsta torrperioden, denna dras dock delvis upp av den exceptionellt långa torrperioden under år 2018. Sett över hela 90-årsperioden observeras en marginellt ökande trend.



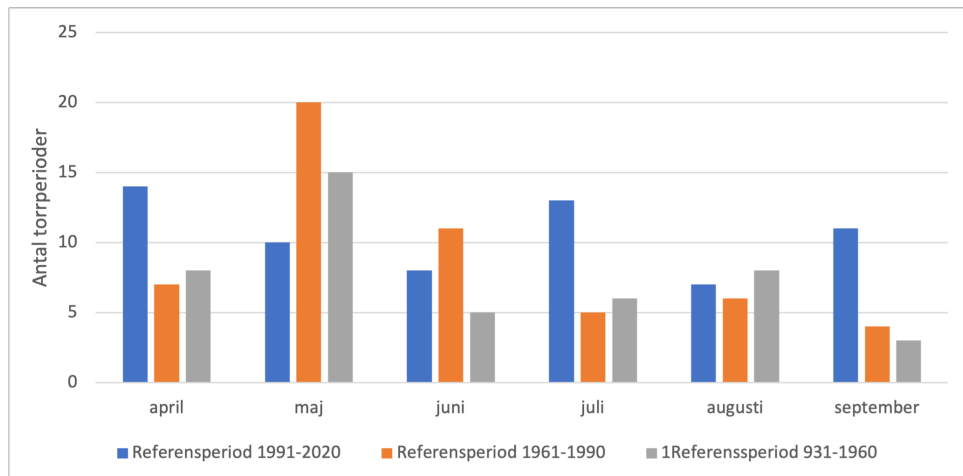
Figur 3: Antal dagar för den längsta sammanhängande torrperiod för perioden april-september. Streckad linje avser trendlinjer för de olika perioderna. Sammanställning av data hämtade för mätstation Uppsala Aut (SMHI 2021c).

Det kan dock vara mer relevant att studera hur frekvent en viss längd på torrperiod har inträffat historiskt, se Figur 4. För normalperioden 1931-60 inträffade torrperioder som var minst 10 dagar långa vid 45 tillfällen, för 1961-90 och 1991-2020 var antalet tillfällen 53 respektive 63 stycken. Vilket skulle kunna tyda på en trend där längre torrperioder blivit mer frekventa. Om alla torrperioder som är 3 dagar eller längre summeras så uppgår tillfällena till 395, 398 och 419 för de respektive perioderna vilket också kan tyda på en svag uppgång för den senaste referensperioden. De riktigt långa torrperioderna, som varar 15 dagar eller längre, är dock ovanliga och för den senaste normalperioden utgjorde de bara ungefär 5% av tillfällena, vilket är något mer än för de tidigare perioderna.



Figur 4: Antal tillfällen torrperioder över 10 dagar har inträffat under perioden april-september. Sammanställning av data hämtade för mätstation Uppsala (SMHI 2021c).

Ifall fördelningen på när torrperioder, längre än 10 dagar, inträffat under vegetationsperioden ses att det varit vanligast att de inträffat under maj månad för åren 1931-1990, se Figur 5. Under den senaste normalperioden har torrperioderna däremot varit mer jämnt fördelade under vegetationsperioden än tidigare normalperioder. Istället är april och juli de månader som är mest utsatta under de senaste 30 åren.



Figur 5: Månadsfördelningen över vegetationsperioden för torrperioder över 10 dagar. Sammanställning av data hämtade för mätstation Uppsala (SMHI 2021c).

2.4.2 Uppsalas framtida klimat

Hur Uppsalas framtida klimat förväntas bli beror på hur koncentrationen av växthusgaser i atmosfären förändras. De olika RCP-scenarierna (Representative Concentration Pathway) beskriver effekten

av människans förmåga att begränsa dessa utsläpp av växthusgaser (Sjökvist et al. 2015). De mest använda och studerade scenarierna är RCP4.5, för begränsade utsläpp och RCP8.5 för höga utsläpp. I Tabell 3 beskrivs vilka antaganden som ligger till grund för de olika scenarierna.

Tabell 3: Antagande som ligger till grund för scenarierna (Sjökvist et al. 2015).

RCP4.5	RCP8.5
<ul style="list-style-type: none"> • Koldioxidutsläppen ökar något och kulminerar år 2040. • Befolkningsmängd något under 9 miljarder runt år 2100. • Lågt arealbehov för jordbruksproduktion till följd av större skördar och förändrat konsumtionsmönster. • Omfattande skogsplanteringsprogram. • Låg energiintensitet. • Kraftfull klimapolitik. 	<ul style="list-style-type: none"> • Koldioxidutsläppen är tre gånger så höga som dagens vid år 2100 och metanutsläppen ökar kraftigt. • Befolkningsmängden ökar till 12 miljarder vilket leder till ökade arealbehov för jordbruksproduktionen. • Teknikutvecklingen fortsätter mot ökad energieffektivitet, dock långsamt. • Stort behov av fossila bränslen. • Hög energiintensitet. • Ingen tillkommande klimapolitik.

Årsmedeltemperaturen för Uppsala län förväntas fram till år 2100 öka med 3°C för RCP4.5 och med ungefär 5°C för RCP8.5, jämfört med referensperioden 1961-1990 (Sjökvist et al. 2015). Nya sammanställningar för den senaste normalperioden, 1991-2020, visar dock att medeltemperaturen redan ökat med 1,5°C jämfört med referensperioden (Eivergård 2021). Den största temperaturskillnaden förväntas inträffa under vinterperioden (december-februari), medan minst temperaturskillnad ses under hösten. Under vår- och sommarperioden ligger temperaturen i linje med förändringen för årsmedelvärdet (Sjökvist et al. 2015). Temperaturökningen leder vidare till att vegetationsperioden förlängs. Vegetationsperiodens start definieras som första gången på året då fyra sammanhängande dagar har en dygnsmedeltemperatur över 5°C. Under perioden 1961-1990 startade vegetationsperioden i genomsnitt runt mitten på april, och varade i ungefär 6 månader. I slutet av århundradet förväntas vegetationsperioden, för RCP4.5, starta ungefär 3 veckor tidigare och varar ungefär 4 veckor längre in på hösten, och blir då ungefär 50 dagar längre jämfört med för referensperioden. För RCP8.5 inträffar starten av vegetationsperioden 50 dagar tidigare och varar ungefär 40 dagar längre in på hösten jämför med referensperioden (Sjökvist et al. 2015).

Även nederbörds mängderna förväntas öka till år 2100 enligt båda RCP-scenarier. Den största förändringen sker under vinter och vår, då nederbörden ökar med ungefär 20% och 40%, för RCP4.5 respektive RCP8.5. Sommaren är den årstid med historiskt mest nederbörd i Uppsala län, i genomsnitt 196mm under perioden 1961-1990. Under denna perioden ökar nederbörden mellan 10-20% för båda scenarierna (Sjökvist et al. 2015). Denna ökning förväntas ske i intensiteten av nederbörden då antalet dagar utan nederbörd inte förväntas ändras i något större utsträckning. Inte heller förväntas

något större förändring i den årligt längsta torrperioden för mellersta Sverige (Kjellström et al. 2021). Antalet dagar, under sommaren (juni-aug), med kraftig (>10mm) och extrem (>20mm) dygnsnederbörd ökar från 5 dagar i genomsnitt till 6-7 dagar för de båda RCP-scenarierna (SMHI 2021a). Den ökade mängden nederbörd minskar dock inte risken för torka eller torrperioder. Antalet dagar med låg markfuktighet förväntas öka från 15 dagar för referensperioden till mellan 30-45 för de olika scenarierna. Vilket delvis skulle kunna förklaras av att evapotranspirationen ökar när temperaturen ökar. Generellt kan man räkna på att evapotranspirationen ökar med ca 5-10% per grad temperaturökning, vilket i Uppsala län grovt sett skulle betyda 15-30% ökning i slutet av århundradet för RCP4,5 och 25-50% ökning för RCP8,5. Vilket potentiellt skulle kunna motverka effekten av den ökade nederbörden (Johansson & Edman 2018). Eriksson (1981) genomförde beräkningar med Penmans formel för den potentiella evapotranspirationen för en rad svenska städer och orter baserade på data från 1961-1978. I Tabell 4 redovisas de beräknade värdena för Uppsala som Eriksson (1981) tagit fram tillsammans med egna uppskattningar gjorda för två, enligt Johansson & Edman (2018), potentiella framtida scenarier med 15% och 50% ökning från Eriksson beräknade värden.

Tabell 4: Månadsvärden för potentiell evapotranspiration i mm/månad och årsvärden mm/år för Uppsala. Sammanställning av värden från Eriksson (1981) samt egna uppskattningar för två framtida avdunstningsökningar, 15% och 50%, utifrån Johansson & Edman (2018) uppskattningar.

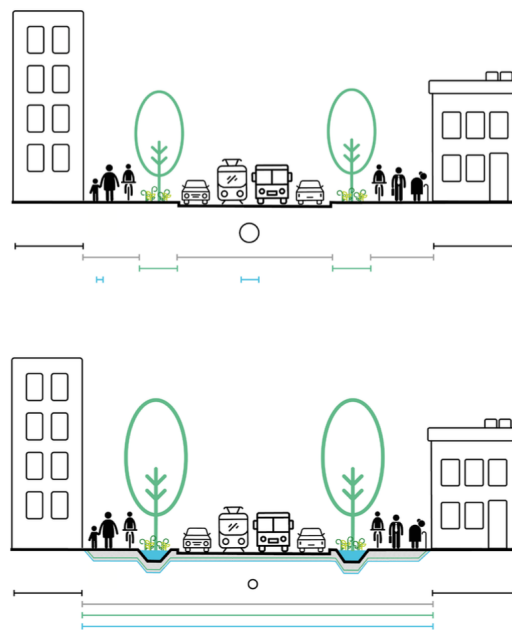
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	År
Eriksson	2	5	16	47	94	126	110	82	41	13	1	0	537
+15%	2,3	5,8	18,4	54	108	145	126,5	94,3	47,2	15	1,15	0	617,6
+50%	3	7,5	24	70,5	141	189	165	123	61,5	19,5	1,5	0	805,5

Värmeböljor är också något som förutspås bli vanligare i framtiden. Med värmeböljor menas i detta avseende sammanhängande dagar med en dygnsmedeltemperatur över 20°C. För referensperioden, 1961-1990, var medeltalet för värmeböljor 3 dagar, detta ökade med några dagar för perioden 1991-2013. I slutet av seklet förväntas värmeböljorna i genomsnitt vara 20 dagar lång för RCP8.5 och ungefär 1 vecka lång för RCP4.5 (Sjökvist et al. 2015). Perioder av långvarig torka ökar ytterligare på avdunstningen och kan driva på perioden av vattenunderskott.

2.5 BGG-system

I följande avsnitt ges en övergripande beskrivning av BGG-system. et BGG-system som beskrivs i följande avsnitt avser den utformning som kommer användas för simuleringarna i modellen.

Blågröngrå-system (BGG-system) är ett relativt nytt sätt att hantera dagvatten på som har utvecklats av företaget Edge. Systemet bygger på att integrera dagvatten(blå), vegetationen(grön) och de hårdgjorda ytorna(grå) till ett gemensamt system istället för att använda separata konstruktioner för de olika funktionerna, se figur 6. BGG-system kan på detta sätt bidra med rening och fördröjning av dagvatten nära källan.



Figur 6: Överst ses de olika funktionerna hanteras med separata konstruktioner. Nedan visas samma gaturum med BGG-system som integrerar dagvattenhantering, vegetation och hårdgjorda ytor. Bildkälla: Edge

I BGG-system utnyttjas förstärkningslagret till de hårdgjorda ytorna som en reservoar för att fördröja dagvattnet, ett så kallat öppet förstärkningslager, se Figur 7. Traditionellt så har bergskross använts som material till förstärkningslager vid vägkonstruktioner. I det öppna förstärkningslagret har detta material ersatts med makadam, som är en typ av bergskross där de minsta fraktionerna aktivt sorterats bort. Genom att sålla bort dessa mindre fraktioner får materialet en betydligt högre porositet utan att för den delen försämra den bärigheten som krävs i materialet för att möta kraven för den gällande trafikbelastningen. Den höga porositeten, 35-40%, gör att stora volymer dagvatten kan fördröjas inom systemet och därigenom minska belastningen på dagvattenledningsnätet. Den höga porositeten ger även materialet en hög hydraulisk konduktivitet vilket är av betydelse för att tillgodose ett högt vatten- och gasutbyte i systemet.

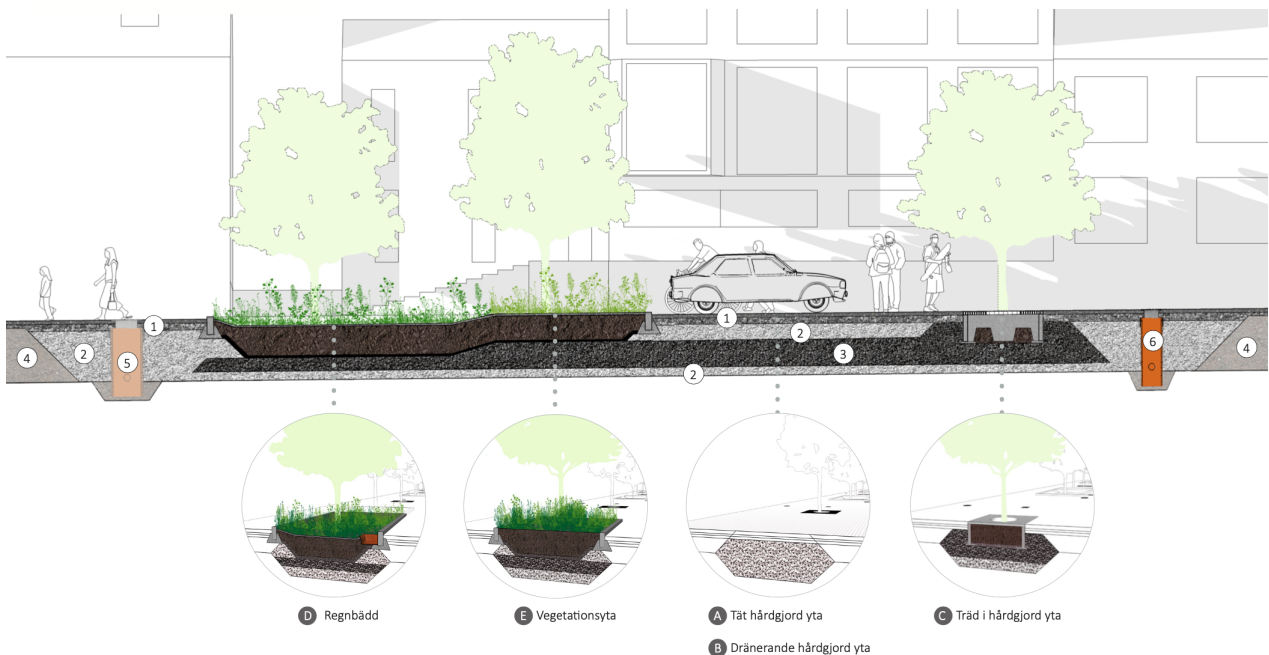


Figur 7: Översiktbild på ett stråk av BGG-system som anläggs i gatans flexzon. I markplan varvas hårdgjorda ytor med regnbäddar, vegetationsytor och träd på ett flexibelt sätt. Bildkälla: Edge

BGG-system utrustas med en styrningsbrunn som reglerar utflödet av dagvatten ur det öppna förstärkningslagret till det konventionella ledningsnätet, se Figur 8. Styrningsbrunnen ska efter ett kraftigt regn kunna tömma ett fullt magasin på 24 timmar så att vatten inte blir stående i systemet. Styrningsbrunnen användas även för att leda ned vatten till det öppna förstärkningslagret. I de fall då nederbröden är så kraftigt att magasinet bräddas har styrningsbrunnen som funktion att även tappa av överskottsvattnet till det konventionella ledningsnätet. Styrningen av systemet gör att det är flexibelt och kan justeras för att klara av nederbörd av varierande intensitet.

Vegetationen som planteras i BGG-system kan anläggas antingen i en regnbädd, vegetationsyta eller som träd i hårdgjord yta, se Figur 8. Träden och växterna planteras i ett växtsubstrat bestående av mindre fraktioner makadam (2/6 mm), biokol och kompost. Detta bildar ett luckert material som skapar gynnsamma förhållanden för vegetationens rötter att sprida sig i. Biokol är ett poröst material som har en hög vattenhållande förmåga, vilket bidrar till att öka mängden växttillgängligt vatten. Samtidigt har biokol en hög specifik area vilket bidrar till att det effektivt kan adsorbära och immobilisera organiska och oorganiska föreningar (Amoah-Antwi et al. 2020; Fransson et al. 2020). Detta gör även att biokol har en hög näringshållande förmåga vilket gynnar växter och träd i systemet. För att ytterligare öka den vattenhållande kapaciteten i växtsubstratet så kan delar av eller allt makadam ersättas med pimpsten, den vattenhållande förmågan kan då ökas till mellan 40-60% av den totala volymen. För att minska avdunstningen från marken i planteringarna läggs ett 5 cm tjockt täcklager med makadam ovanpå växtsubstratet. Detta lager bildar då ett kapillärbrytande skikt mellan växtsubstratet och luften, vilket minskar mängden markvattnet som är i kontakt med markytan och avdunstar utan att komma till nytta för växterna. Täcklagret minskar även erosionskador som uppstår på växtsubstratet vid kraftig nederbörd och höga avrinningshastigheter.

1. Tät eller dränerande bär- och siltlager
2. Öppet förstärkningslager
3. Öppet förstärkningslager med substratförbättrande material (sfm)
4. Avbrott
5. Styrningsbrunn
6. Luftdagvattenbrunn



Figur 8: Längdsnitt av en enhet med öppet förstärkningslager. Bilden visar ett förslag på hur regnbäddar, vegetationsytor och träd i hårdgjord yta kan anläggas i BGG-system. Bildkälla: Edge

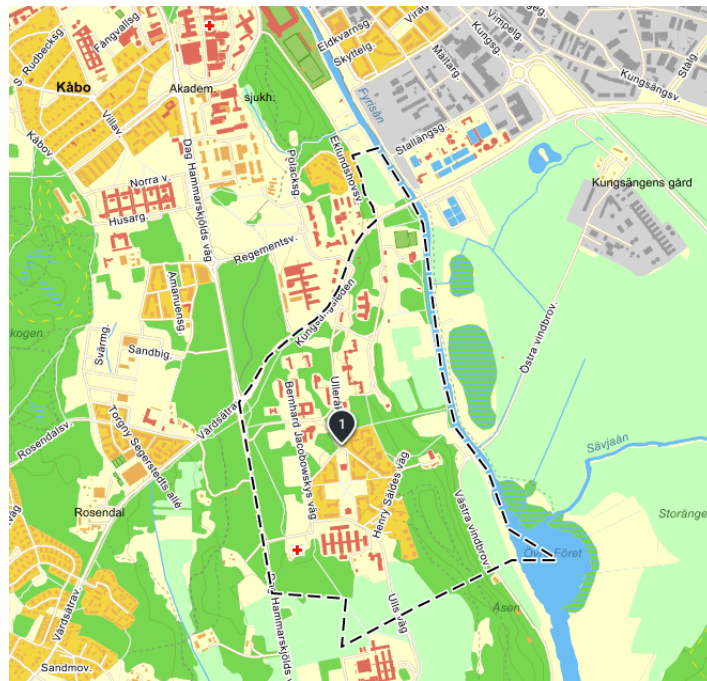
Regnbäddarna i BGG-system konstrueras för att kunna fördröja och rena de första nederbörsmängderna som faller inom området. De anläggs därför i nära anslutning till gatusektionens lågpunkt dit vägavsnittets lutning naturligt leder dagvattnet och som sedan styrs in i regnbädden. För att regnbäddens ska kunna hantera nederbörden anläggs bädden svagt skålformad vilket skapar en fördröjningszon på ytan, se Figur 8. I fördröjningszonen tillåts vattnet bli stående innan det infiltreras ned i växtbädden och kommer till nytta för vegetationen. Regnbäddens uppgift är att ta hand om det första nederbörsmängderna vilket också är det dagvatten som innehåller mest föroreningar. Dagvattnet renas då genom filtrering, biologisk nedbrytning och upptag i växter och på partiklar. Kraftigare nederbörsmängder som inte växtbädden hinner infiltrera leds vidare till styrningsbrunnen där det sedan fyller det öppna förstärkningslagret underifrån. För att förhindra att finmaterial från växtsubstratet ska rinna ned till det öppna förstärkningslagret så separeras de två zonerna med hjälp av en avskiljande kokosmatta, vilket förhindrar igensättning i det öppna förstärkningslagret. Skillnaden mellan det grova öppna förstärkningslagret och det finare växtsubstratet skulle även det kunna skapa ett kapillärbrytande skikt, vilket förhindrar vatten från att dränera ned från växtbädden till det öppna förstärkningslagret om inte det öppna förstärkningslagret är fyllt (Sjöman & Slagstedt 2015).

2.6 Områdesbeskrivning

Syftet med denna rapport har varit att studera hur BGG-system klarar av torrperioder. Detta kommer genomföras genom att i en modell simulera en historisk meteorologisk period med utgångspunkt i UL-

leråker.

Området Ulleråker är en stadsdel belägen strax söder om centrala Uppsala, se Figur 9. Området har en lång historia av tidigare bedriven vårdverksamhet, men majoriteten av denna verksamhet avslutades på slutet av 1980-talet. Sedan nedläggningen av vårdverksamheten har området med tiden bebyggt med bostäder och utgör idag en del av Uppsalas plan för vidare expansion. Uppsala kommuns plan är att till år 2030 utveckla området med 7000 nya bostäder, skolor, förskolor, verksamhet, handel och annan service. I ett första steg ska kvarteret Sagan anläggas i Ulleråkers centrala delar med omkring 450 bostäder och lokalytor (*Uppsala Kommun* 2018)



Figur 9: Översiktskarta över området Ulleråkers placering söder om Uppsala och dess utsträckning markerad i bild. Bildkälla: Eniro.se.

Uppsalaåsen som försörjer Uppsala med dricksvatten och som är av riksintresse som dricksvattentäkt sträcker sig i nord-sydlig riktning rakt igenom hela Ulleråker (*Uppsala Kommun* 2018). Det ställs därför höga krav vid planering och genomförande av nybyggnationen så att vattenkvaliteten inte riskerar att försämrans i åsen.

Enligt SMHIs redovisade modellberäkningar i S-HYPE ges vattenbalansen för de två områden som ansluter till Ulleråker, för det senaste året, av att nederbörden uppgår till ungefär 620 mm på årsbasis, medan evapotranspirationen varierar mellan 328-400 mm och avrinningen varierar mellan 216-291 mm på årsbasis (SMHI 2021d). Nederbörden i denna vattenbalansen är högre än årliga medelvärde som uppmätts vid SMHIs mätstationen i Uppsala för den senaste normalperioden, som uppgår till ungefär 565 mm/år (SMHI 2021c).

I den tilltänkta utvecklingen av Ulleråker planeras det för dagvattenhantering med BGG-system. Sy-

stemet som är förslaget utgörs av ett sammanhängande stråk av öppet förstärkninglager med en sammanlagd volymen på 140 m³. I detta stråk anläggs tre sektioner med regnbäddar som blir vardera 20, 19 och 13,5 meter långa. Samtliga får en bredd om 1,76 meter och kommer vara 0,7 meter djupa. Regnbäddarnas sammalagda yta uppgår till 92 m² och en volym på ungefär 39 m³. I regnbäddarna planeras det för plantering av sammanlagt 11 skogslindor, *Tilia cordata* 'Rancho', och undervegetation bestående av mindre buskar. Träden beräknas nå en storlek motsvarande 50% av dess teoretiskt maximala storlek. Kronutbredning beräknas då nå en areal storlek av 209 m². Detta ger en kvot mellan volymen växtbädd och trädens kronprojektion på ungefär 0,2 m³/m². Det tänkta BGG-systemet kommer omhändertaga dagvatten från 650 m² asfalterad och stenlagd yta och i framtiden eventuellt ytterligare ungefär 500 m² från tak på närliggande fastigheter.

Tabell 5: Sammaställning av de olika regnbäddarnas ungefärliga mått och måtten på hela det öppna förstärkningslagret.

Parameter	Regnbädd 1	Regnbädd 2	Regnbädd 3	Öppet förstärkninglager
Längd [m]	19	20	13,5	73
Bredd [m]	1,76	1,76	1,76	4
Djup [m]	0,7	0,7	0,7	1,5
Yta [m ²]	33,4	35,2	23,8	292
Volym [m ³]	14,2	14,8	10	140

2.7 MIKE SHE

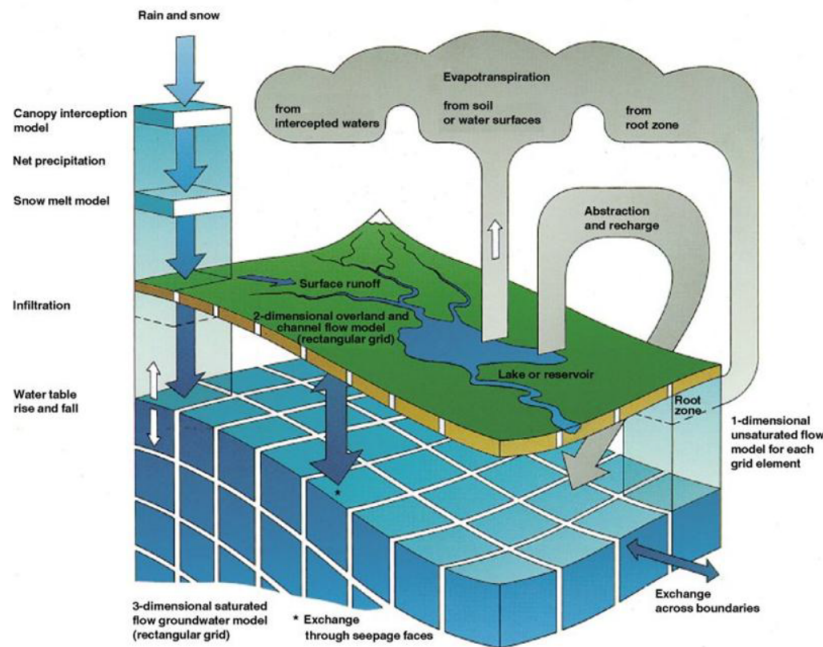
Hydrologiska modeller används för att ge en generaliserad och konceptualiserad bild av hydrologins verklighet. Med hjälp av sådana modeller kan framtida förändringar förutspås eller förståelse för processer inom ett område erhållas. Utgångspunkten för alla hydrologiska modeller är att vatten inte kan försvinna, och att det avrinningsområde som studeras fungerar som ett enskilt hydrologiskt system (Grip & Rhode 1994). Regnet som faller inom området måste således lagras tillfälligt i snö eller grundvatten, avdunsta eller flöda ut ur området. Detta beskrivs av vattenbalansen;

$$\text{Nederbörd} = \text{Förändring i lagring} + \text{Avdunstning} + \text{Avrinning}.$$

Uppgiften som ska lösas för Edge är att undersöka hur ofta träd i regnbäddar utsätts för vattenunderskott och hur systemet kan förändras för att bättre undvika att detta sker. För att lösa denna uppgift är en hydrologisk modell ett bra verktyg. För att kunna representera BGG-systemen krävs att modellen ska kunna beskriva flöden på markytan, i den omättade zonen och i den mättade zonen samt hur vatten interagerar mellan dessa zoner.

Den programvara som har använts för att beskriva BGG-systemen är MIKE SHE. MIKE SHE är ett modelleringsverktyg som har utvecklats av DHI och är ett flexibelt och avancerat ramverk för integrerad hydrologisk modellering. I MIKE SHE kan alla de landbaserade hydrologiska processerna, såsom nederbörd, evaporation, ytavrinning, flöden i den mättade och omättade zonen, simuleras med hjälp av numeriska metoder. I modellverktyget baseras dessa numeriska metoder på fysikaliska lagar och

indata som kan varieras både temporalt och spatiellt. I Figur 10 ses en schematisk bild av de processer som ingår i MIKE SHE. För en mer detaljerad beskrivningar av de ingående processerna som inkluderas i MIKE SHE hänvisas till MIKE SHE:s användarmanual (DHI 2022).



Figur 10: Schematisk bild av MIKE SHE och de ingående hydrologiska processerna. Bildkälla: (DHI 2022).

Det är av vikt att från början förtydliga att en modell endast är en förenklad representation av verkligheten. Genom att förenkla naturliga hydrologiska processer till numeriska ekvationer kan en tillräckligt tillförlitligt beskrivning av verkligheten erhållas. Men de naturliga processerna är mer komplicerade och slumpartade än vad som kan beskrivas av de ekvationer som modellen är uppbyggd av (DHI 2022).

2.8 Tidigare studier

Det finns också en rad studier som har undersökt hur träd påverkas av torka och vilka effekter det får för träden. Men det finns, till författarens bästa vetskap, bara en tidigare studie som, genom modellering, har undersökt hur ofta träd i urbana miljöer utsätts för låga vattenhalter och torkstress. DeGaetano (2000) har valt att undersöka vilka växtbäddsvolymer som krävs för att undvika torkstress och hur ofta växtbäddar eventuellt behöver bevattnas. Denna studie har en annan infallsvinkel och syftar till att förbättra utformningen av BGG-system och generellt öka förståelsen för stadsträds behov. Denna studie bryter delvis därför ny mark och dessutom den första i sitt slag som genomförts i MIKE SHE.

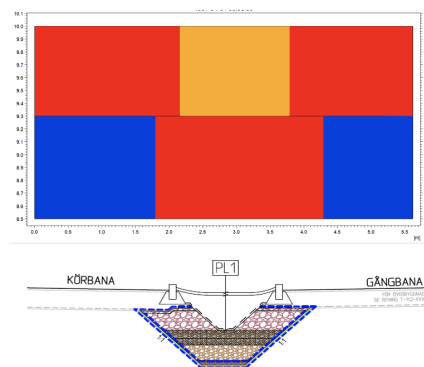
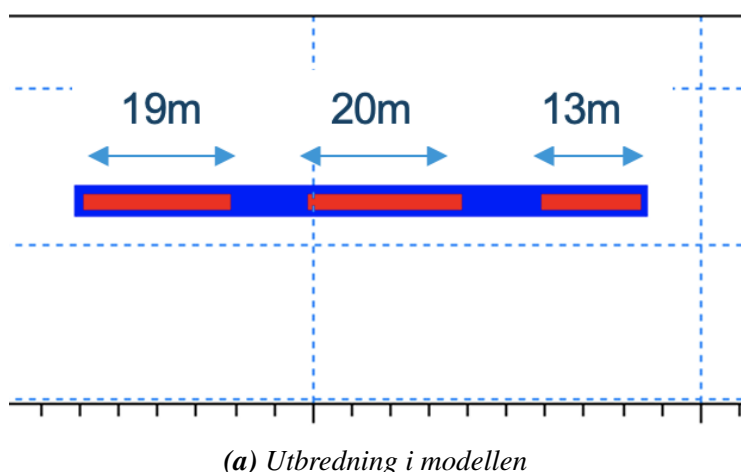
3 Metod och material

I följande avsnitt förklaras modelluppsättningen, valda dataset, parameteruppsättning och de simuleringar som genomförts.

3.1 Modelluppsättning

Modellen i detta projekt har satts upp av DHI för att beskriva det planerade BGG-systemet i Ulleråker. Modellområdet som byggts upp i MIKE SHE har begränsats till utsträckningen av det öppna förstärkningslagret verkliga utbredning, se figur 11a, vilket motsvarar en yta av 296 m². Modellområdet består av 74 celler på längden och 4 celler i bredd, där varje cell motsvarar en yta av 1x1 meter. Den valda upplösningen (1x1m) på cellerna i modellen gör att vegetationsytornas areal som uppgår till 104 m², vilket ger en differens på 12 m² jämfört med det verkliga scenariot, se Tabell 5. Denna differens kommer av att vegetationsytorna i modellen är 2 meter breda medan de i de planerade BGG-systemet har en bredd av 1,74 meter.

Modellen har anpassats i den vertikala profilen för att så långt som möjligt efterlikna BGG-systemets verkliga utformning, se figur 11b. BGG-systemen anläggs i verkligheten med sluttade sidor i djupet. För att behålla en kortare beräkningstid i modellen gjordes en förenkling av detta och de sluttande sidorna motsvaras därför av det undre lagret av det öppna förstärkningslagret delats upp i tre sektioner. De yttre sektionerna, blåa i figur 11b, ges istället ett lägre värde på den hydrauliska konduktiviteten. Den rektangulära form som systemet har fått efter uppbyggnaden i modellen gör volymen på det öppna förstärkningslagret och regnbäddarna skiljer sig något åt från den planerade förlagad, se Tabell 5. De blå områdena mellan regnbäddarna i Figur 11a representeras i djupprofilen som i Figur 11b fast utan de orangea områdena. Regnbäddarna i modellen har en volym av ungefär 73 m³ och det öppna förstärkningslagrets volym uppgår till 243 m³. Modellen har byggts upp med 10 beräkningslager, fördelade över två geologiska lager, där de översta fem lagren är 10 cm höga och de fem understa är 20 cm höga. Detta ger att det sammanlagda antalet beräkningsceller i modellen uppgår till 2960 stycken.



Figur 11: I (a) visas modellområdets utbredning där de röda områdena representerar regnbäddarna och de blå det öppna förstärkningslagret. I (b) visas en tvärsnittsbild över BGG-systemet och hur systemet representeras i modellen. Röda områden motsvarar det öppna förstärkningslagret, orange område motsvarar regnbädden och blå områdena vanligt förstärkningslager.

Modellen är en fysikalisk modell som beskriver de stora processerna som är av relevans i BGG-systemet, vilket framförallt är evapotranspirationsprocesser, mättade/omättade flöden samt ytavrinning. Modellen drivs av ett antal meteorologiska indata. I simuleringarna används nederbördsdata för Uppsala som input. Nederbörden belastar BGG-systemen direkt. Nederbörden fångas upp av vegetationen (interception), avdunstar från markytan eller infiltrerar ned i markprofilen. Den nederbörd som infiltreras ned i marken försvinner sedan ut ur modellen via tre vägar antingen via transpiration från vegetationsytorna, via markevaporation eller via dränering.

För att beräkna evapotranspirationen i modellen användes Kristensen och Jensenmetoden. Denna metod baseras på empiriska ekvationer uppbyggda utifrån fältundersökningar genomförda av Kristensen och Jensen. För att genomföra beräkningar med denna metod krävs ingående data i form av en tidsserie för den potentiella evapotranspirationen, värden för Leaf Area Index, rotdjup samt empiriska vegetativa parametrar som kontrollerar evapotranspirationen. De vegetationsparametrar som använts i denna studie har erhållits av DHI från ett av deras tidigare projekt genomförda i Upplands län. Beräkningarna av den totala evapotranspirationen beror på upptagandet av nederbörd av lövverket och evaporation därifrån, evaporation från markytan samt transpirationen från växterna. Transpirationshastigheten från växterna baseras på markfuktigheten i den omättade zonen (DHI 2022).

Vattenflödet i den omättade zonen är bland de viktigaste processerna i modellen. Gravitationen är den dominerande kraften på infiltrationen i den omättade zonen vilket gör att flödet framförallt sker vertikalt. Då detta antagande kan göras beräknas vattenflödet endast i vertikalled i MIKE SHE. Detta kan skapa begränsningar i modeller med kraftig lutning och branta backar, men kommer ha mindre effekt på denna modell som har satts upp som en helt plan modell. För att beräkna det vertikala flödet har gravitationsflödesmetod använts, denna metod är en förenkling av Richards ekvation där tryckhuvudet ignoreras och istället säger att flödet endast påverkas av gravitationen. Valet av denna metod gör att modellen blir betydligt snabbare i beräkningarna än vid val av Richards ekvation, och är väl

anpassad till grövre jordarter och då en exakt evapotranspiration och försenad grundvattenbildning är av intresse (DHI 2022). Transporten av vattnet genom jordarterna beskrivas av jordartens retentions- och konduktivitetskurva. Retentionskurvan, eller pF-kurvan, beskriver hur vattnet i jordens porer dräneras vid olika bindningstryck och konduktivitetskurvan beskriver jordartens vattenledande förmåga beroende av mättnadsgrad och porstorlek.

För att beräkna flödet i den mättade zonen används den implicita finitdifferensmetoden. Denna metod använder en tredimensionell form av Darcys ekvation för mättade flöden och som sedan löses numeriskt med en implicit finitdifferensmetod för att beskriva hur grundvattennivån förändras över tid.

Dräneringen i modellen sker inte utifrån en givet punkt eller genom en given dirigerad riktning utan sker genom att vatten hela tiden tas bort med en given hastighet från alla celler utifrån en given höjd i modellen. Denna höjd har satts till 1,4 meters djup i modellen efter den nivå som dräneras i det verkliga BGG-systemet.

3.1.1 Modellinställningar

Simuleringarna i denna studie har byggts på att variera ett antal parametrar och indata och studera effekten som dessa variationer har på resultatet. De flesta parametrarna har dock hållits konstanta under simuleringarna. Nedan följer en redogörelse för de inställningar och parametrar som användes i denna studie.

Tabell 6: Inställningar för modellen.

Inställningar	Val
Water movement - overland flow	Finite difference
Water movement - unsaturated flow	Gravity flow
Water movement - saturated flow	Finite difference
Overland solver type	Successive overrelaxation
Saturated zone solver type	Transient
Unsaturated flow - initial conditions	Equilibrium pressure profile to field capacity
Unsaturated flow - macropore flow	None
Saturated zone - specific yield	Derive from UZ soil parameters
Saturated zone - drainage options	Drainage not routed but removed from model

Tabell 7: Tidstegsinställningar för modellen.

Parameter	Inställning
Initial basic time step [timmar]	0,5
Max allowed OL time step [timmar]	0,5
Max allowed UZ time step [timmar]	2
Max allowed SZ time step [timmar]	24
Max precipitation per time step [mm]	20
Max infiltration per time step [mm]	20

3.1.2 Data och simuleringsperiod

Den meteorologiska data som har används som input för att driva modellen är ett dataset innehållande mätvärden för temperatur och nederbörd, samt beräknade värden för den potentiella evapotranspirationen.

Ett dataset hämtades från SMHIs väderstation i Uppsala, stationsnummer 97520 (SMHI 2021c). Datasetet innehöll mätserier för nederbörd och temperatur för åren 1900-2020. Mätserien som användes för nederbörden utgjordes av dygnvärden med en noggrannhet på 0,1 mm. Mätserien för temperaturen har timupplösning med en noggrannhet på 0,1°C. Då SMHI inte genomför några mätningar av den potentiella avdunstningen i egen regi, föll valet på att använda Eriksson (1981) beräknade värden för Uppsala. Dessa värden för den potentiella evapotranspirationen har beräknats med Penmans formel och har redovisats som månadsvärden. Den dagliga potentiella evapotranspirationen har därför antagits kunna motsvaras av ett medelvärde av månadsvärdena.

Den tidsperiod från vilken indata valdes ut till simuleringarna var perioden 1991-2020. Valet gjordes av två orsaker. Det första var att intervallet av mätpunkter för temperaturen har förändrats mycket för det dataset som hämtades. Sedan september 1986 har temperaturen mätts varje timme och för den valda perioden finns det således 24 mätpunkter per dygn för hela perioden. Den andra anledningen är att Uppsala har upplevt en ökning av medeltemperaturen på 1,5°C sedan normalperioden 1961-1990, och det ansåg därför inte relevant att studera tidigare perioder.

3.2 Simuleringar

Ett antal olika simuleringar har genomförts inom ramen för detta projekt. Målet med dessa simuleringar har varit att kunna ge svar på 3 av frågeställningarna som satts upp i detta projekt. Sammanlagt har 18 olika simuleringar genomförts och analyserats för att kunna ge svar på hur BGG-system bättre ska kunna utformas för att hantera torka. I Tabell 8 redovisas alla de simuleringar som genomförts inom detta projekt. En simulering har utgjort en ursprungsfall inom denna studie, och avser den uppsättning som bäst efterliknar det verkliga scenariot i Ulleråker. Detta ursprungsfall har ett tillrinningsområde som är 650 m² stort. Material i systemet enligt växtsubstrat och öppet förstärkningslager i Tabell 10, och växtval lövträd.

Tabell 8: Sammanställning av de simuleringar som genomförts i denna studie. Sammanställning redovisar vilka parametrar som varierats och hur många olika simuleringar som genomförts för varje varierande parameter.

Parameter	Antal simuleringar
Variation av tillrinningsområde	5
Variation av crop factor	3
Variation av växtsubstrat	2
Variation av djup på regnbädd	2
Variation av växtval	2
Variation av dräneringsdjup	2
Variation av dräneringshastighet	2

3.2.1 Variation av tillrinningsområde

Målet med dessa simuleringar är att undersöka effekten av storleken tillrinningsområdena, detta genomförs genom att variera arealen som regnbäddarna avvattnar.

Det tilltänkta BGG-systemet kommer i ett första steg belastas med dagvatten från ett 650 kvadratmeter stort område. För att undersöka vilken effekt storleken på tillrinningsområdet har på markfuktigheten i systemet simulerades fem olika scenarier för olika stora sområden. Utöver scenariot för den tilltänkta utformningen simulerades 250, 450 och 1150 kvadratmeter stora tillrinningområden, samt då nederbörd endast faller över själva modellområdet. Då utformningen på modellområdet endast avser BGG-systemets utbredning korrigerades nederbörden genom att multiplicera den faktiska nederbörden för varje enskild dag med en korrektionsfaktor för att motsvara mängden nederbörd som faller på hela de olika tillrinningsområdena. Att korrigera nederbörden på detta sätt leder till att mäktigheten på snötäcket kommer öka på ett realistiskt sätt. För att kompensera för detta så att snön inte ligger kvar på marken för långt in på våren korrigeras även snösmältningskoefficienten med samma korrektionsfaktor. I tabell 9 presentera vilken faktor som användes för de olika områdena samt vilken snösmältningskoefficient som användes vid simuleringarna. Dessa har tagit fram genom att beräkna kvoten mellan de verkliga regnbäddarnas yta och de olika tillrinningsområden. Detta gjordes för att mängden vatten som omhändertas av regnbäddarna i modellen ska efterlikna det verkliga scenariot i så stor utsträckning som möjligt.

Tabell 9: Korrektionsfaktor som nederbörden har multiplicerats med för att simulera olika belastande områden samt den snösmältningskoefficient som användes för att korrigera för ökad snömängd.

Scenario	Korrektionsfaktor nederbörd	Snösmältningskoefficient [mm/°C/dag]
Endast område	1	2
250 m ²	2,7	5,4
450 m ²	4,9	9,8
650 m ²	7,0	14
1150 m ²	12,5	25

3.2.2 Variation av crop factor

Målet är att undersöka om det går att variera hur stora träd som representeras i modellen.

Då transpirationen i modellen endast sker i de celler som representerar regnbäddarna är denna yta relativt liten i relation till den yta som trädens kronarea eventuellt skulle kunna uppnå. Vilket gör att regnbäddarna i modellen får ett relativt högt mått av jordvolym/kronprojektion. För att undersöka om det går att simulera större kronarealer i modellen på ett relativt enkelt sätt valdes att studera hur en variation av crop factor för ett bestämt växtval (lövträd) påverkar resultaten. Crop factor är i MIKE SHE en konstant som multipliceras med den ingående potentiella evapotranspirationen för att få en referens evapotranspiration till transpirationsberäkningarna. Sätt crop factor högre än 1 tillåts därmed den aktuella transpirationen vara högre än den potentiella evapotranspiration. Teoretiskt skulle då en fördubbling av crop factor leda till dubbelt så hög transpiration och därmed kunna motsvara en dubbelt så stor kronarea. I den ursprungliga filen som tillhandhölls med vegetationval var crop factor satt till 1,0. För att undersöka om variation av crop factor går att koppla till större kronarea genomfördes simuleringar med crop factor 2,0, 3,0 och 4,0.

3.2.3 Variation av växtsubstrat

Målet med dessa simuleringar är att undersöka om det är skäligt att använda pimpsten istället för makadam i växtsubstratet.

Regnbäddarna i BGG-system fylls idag med ett växtsubstrat bestående av mindre fraktioner av makadam, kompost och biokol. Detta växtsubstrat beräknas ha en porositet på ungefär 35-40% och kunna hålla ungefär 20% växttillgängligt vatten. Då ingen information finns om växtsubstratets retentionskurva har en retentionskurva byggts upp utifrån den ungefärliga porositeten samt det växttillgängliga vattnet, och utformats utefter snarlika jordarters retentionskurvor. De jord och materialtyper som utformningen bygger på var finare moränjordar, matjord och grus. För att utöka det växttillgängliga vattnet som kan hållas i regnbäddarna kan olika stora delar av makadamet bytas ut mot pimpsten. Simuleringar har genomförts för ett fall då 50% av makadamet ersätts med pimpsten och ett fall då allt makadam ersätts med pimpsten. Retentionskurvorna för dessa substrat har utgått ifrån det som sattes för det vanliga växtsubstratet men har utökats för att kunna hålla den tänkta mängden växttillgängligt vatten. För simuleringen med 50% pimpsten har mängden växttillgängligt vatten antagits

vara 40% och för simuleringen med 100% pimpsten så har växtsubstratet antagits kunna hålla 60% växttillgängligt vatten. I tabell 10 redovisas de inställningar som gjorts för retentionskurvorna.

Tabell 10: *Värden för att konstruera retentionskurvorna. Värdena för växtsubstraten avser vattenhalten som andel av hela regnbäddsvolymen. Fältkapacitet anges vid Pf 2,0 och permanenta vissningsgränsen vid 4,2. Pf 0 anger vattenhalten vid helt mättade förhållanden. Värdena för det öppna förstärkningslagret har hållits konstanta genom alla simuleringar.*

Pf	Växtsubstrat	50% pimpsten	100% pimpsten	Öppet förstärkningslager
0	0,4	0,5	0,7	0,35
1,0	0,38	0,48	0,68	0,25
2,0	0,32	0,44	0,64	0,1
2,5	0,28	0,39	0,49	0,07
3,0	0,25	0,25	0,25	0,05
3,5	0,19	0,13	0,13	0,04
4,2	0,12	0,04	0,04	0,03

3.2.4 Variation av djup på regnbädd

Målet är att undersöka vilken effekt en förändrad volym på växbäddarna har på BGG-systemens torktålighet.

Ett sätt att tillgängliggöra en större mängd växttillgängligt vatten för vegetationen är att öka storlek på regnbäddarna. Den areala utbredningen på vegetationsytorna inom modellområdet har valts att hållas konstant (104 m^2) genom alla simuleringarna. Genom att istället variera djupet på regnbäddarna, kan effekten av att öka storlek på regnbäddarna undersökas. De djup som har undersökts i denna studie är djupet för grundutförandet av modellen som är 0,7 meter, vilket ger en sammanlagd volym av alla regnbäddarna på $72,8 \text{ m}^3$. Utöver grundutförandet testas djupen 0,4 och 0,9 meter, vilket ger en sammanlagd volym på $41,6$ respektive $93,6 \text{ m}^3$ och en kvot mellan jordvolym och kornarea på $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ respektive $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

3.2.5 Variation av växtval

Målet var att undersöka om olika växter genererar olika respons på systemet.

I det BGG-system som är tänkt att anläggas i Ulleråker planeras det att plantera lövträd. Ett antal simuleringar med varierande växtval genomfördes för att se om växtvalet har någon inverkan på antalet dagar som regnbäddarna utsätts för torra förhållanden. Utöver lövträd så simulerades modellen för barrträd samt för buskar. Variationen i de olika växtvalens transpirationsparametrar går att se i tabell 11. Rötternas djup och utbredning antas vara samma för både lövträden och barrträden. Medan rottdjupet för buskarna är 0,8 meter och endast har rotutbredning i samma utrymme som regnbäddarna. Leaf area index(LAI) varierar under året för både lövträd och buskar, som är lövfällande växter. LAI

är i dessa fall noll under vintern och når sedan maximalt LAI under sommarmånaderna. Barrträden som är städsegröna växter och därmed behåller sina blad hela året runt har ett konstant LAI under hela året.

Tabell 11: Transpirationsparametrar för de olika växtvalen som använts i simuleringarna. C_{int} anger hur mycket nederbörd som interceperas per enhet av Leaf Area Index i varje tidsteg. C_1 , C_2 och C_3 är konstanter som är direkt kopplade till transpirationsekvationen i MIKE SHE. Aroot anger hur rötterna fördelas i djupprofilen, då värdet går mot 0 blir rötter mer jämt fördelade i profilen. Leaf Area Index (LAI) kopplar hur stor lövarea som finns per cell. Crop factor relaterar transpirationen till potentiella evapotranspirationen.

Parameter	Lövträd	Barrträd	Buskar
C_{int}	0,05	0,5	0,05
C_1	0,6	0,3	0,3
C_2	0,2	0,2	0,2
C_3	20	20	20
Aroot	1	1	1
LAI	0-6	7	0-4
Crop factor	1	1	1

3.2.6 Variation av dräneringsdjup

Målet med dessa simuleringar är att undersöka om det går att tillgängliggöra mer vatten i botten av BGG-systemen och vilket effekt detta får.

I botten på BGG-systemen anläggs inom systemet ett antal tvärgående minivallar på ett givet intervall. Dessa minivallar tillåter en viss mängd vatten att stanna kvar i systemet och på så sätt vara tillgängligt för trädens rötter. Det är av intresse att undersöka hur höjden på dessa minivallar inverkar på trädens förmåga att tillskansa sig vatten under längre torra perioder. I modellutformningen har inga minivallar konstruerats, så för att simulera olika nivåer av minivallar har djupet varifrån vatten dräneras ut ur modellen varierats. De olika dräneringsdjup som har undersökts är 1,5 meter, 1,4 meter samt 1,2 meter. Dessa höjder var tänkt att motsvara konstruktioner då inga minivallar anläggs och då de är 10 respektive 30 cm höga.

3.2.7 Variation av dräneringshastighet

Målet är att undersöka om det går att tillgängliggöra mer vatten genom att förändra dräneringshastigheten.

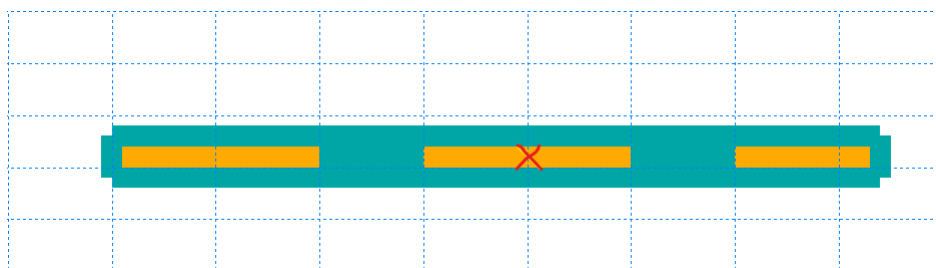
Det öppna förstärkningslagret i BGG-systemet töms på vatten via dräneringsbrunnen. I Ulleråker planeras dräneringshastigheten ställas in till en hastighet av 20 l/s/ha. För att se vilken effekt dräneringshastighet har på systemet genomfördes simuleringar då hastigheten både ökades och minskades med 50%, dvs då hastigheten sattes till 10 l/s/ha samt 30 l/s/ha.

3.3 Validering av modellen

Det finns idag ingen data som det går att kalibrera modellen mot, men då MIKE SHE är en fysikalisk modell är behovet av kalibrering mindre än för exempelvis en konceptuell modell. I ett första steg utfördes en kvalitativ validering av modellen för att säkerställa att modellen är stabil och att responsen i system beter sig som förväntat. För att ytterligare validera modellen och dess tillförlitlighet har vattenbalansen studerats. I MIKE SHE finns ett verktyg som beräknar vattenbalansen för antingen hela modellen eller specifika delar av den. Ur detta verktyg har beräknade värden för evaporation, transpiration och avrinning hämtats och som sedan har jämförts med referensvärden för Uppsala beräknade i S-hype av SMHI, se avnitt 2.6. Resultaten från vattenbalansen visar att modellen ligger inom ramarna för vad som kan förväntas i Uppsala och det beräknade felet i vattenbalansen är lågt vilket styrker modellens tillförlitlighet.

3.4 Analys av data

Resultaten som presenteras är sammanställda från den cell i modellen som är förkryssad i Figur 12. Värden har tagits ur alla de lager som representerar regnbäddarna i de givna simuleringarna. Resultaten som presenteras har således fokuserats enbart till vattenhalten i regnbäddarna och hur denna förändras över tid. Resultaten som presenteras har bearbetats genom att ta fram medelvärdet av vattenhalten från de beräkningslagren som utgör regnbädden. Variation av vattenhalten i djupet av regnbädden har därmed inte tagits i beaktning. Valet att sammanställa resultaten på detta sätt har gjorts efter att okulärt studerat resultaten från olika celler utan att se relevanta skillnader, samt den tidsmässiga begränsningen som omfattar denna studie.



Figur 12: Översikt bild av modellområdet och markering av i vilket cell som resultaten sammanställts ifrån.

3.4.1 Gränser av markfuktighet för torka

Då det, till författarens bästa vetskap, inte finns någon säker nivå av vattenhalt då träd kommer uppleva kritiskt negativ påverkan har fyra olika gränser valts ut att undersökas. Dessa nivåer avser dagar då vattenhalten i regnbäddarna underskrider 75, 50, 25 samt 10% av det växttillgängliga vattnet (VTV). Gränsen 75% VTV har valts utifrån tidigare rekommendationer för att upprätthålla optimal vitalitet hos träden (DeGaetano 2000; Lindsey & Bassuk 1992). Gränsen 50% har satts utifrån den nivå av VTV då bevattning ofta sätts in för grödor inom jordbruket (Wesström 2022). Gränsen 10%

har valts ut då den använts i en tidigare studie som studerat torka på stadsträd (DeGaetano 2000). Gränsen 25% har valts för att fånga upp tillfällena mellan gränserna 50 och 10%.

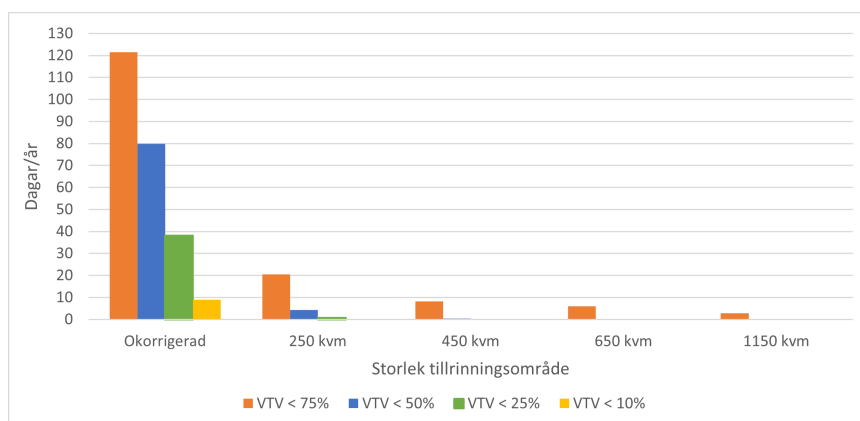
Då stadsträd bidrar med många ekosystemtjänster som är gynnsamma för både stadsmiljön och människor bör så gynnsamma förhållanden som möjligt eftersträvas. Träd som placeras i gaturummen kommer dock klara av perioden med vattenhalter under nivån 75% VTV och även gränsen 50% är en nivå träden mest troligt klarar av även om det sker under icke optimala förhållanden. Vid gränserna 25 och 10% finns det risk att delar av det vatten som finns kvar i regnbädden inte kommer vara tillgängligt för träden, då dess rötter inte når dit vattnet är. Dessa gränser bör därför ses som mer kritiska för trädens hälsa.

4 Resultat

I följande avsnitt presenteras resultaten för de olika simuleringar som genomfördes i denna studie.

4.1 Tillrinningsområden

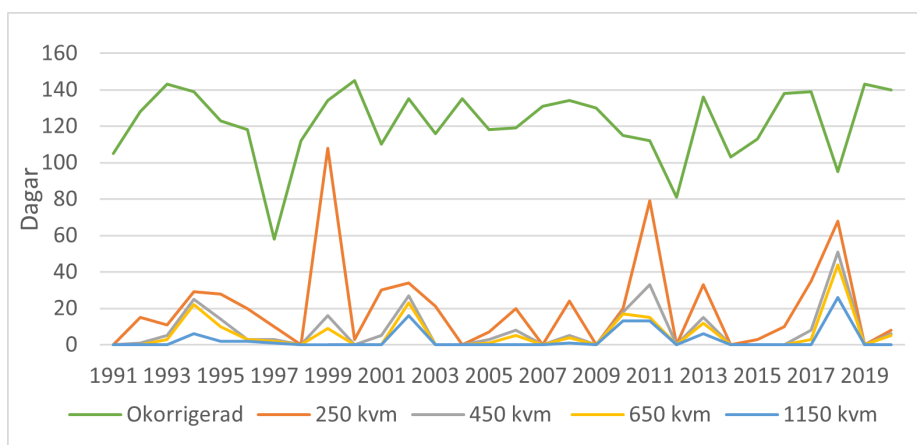
Resultaten från simuleringarna av varierande storlek på området som avvattnas av regnbäddarna visar att antalet dagar som det växttillgängliga vattnet når under en viss given gräns minskar med ökande storlek på det belastande området. För alla storlekar på tillrinningsområden är regnbäddarna alltid återfyllda till minst fältkapacitet vid vegetationsperiodens start. I figur 13 visas det genomsnittliga antalet dagar, under perioden april-september, som mängden växttillgängligt vatten når under gränserna 75%, 50%, 25% och 10% varje år. Den största skillnaden observeras mellan den okorrigerade nederbörden och då nederbörden korrigeras för att motsvara 250 m². Antalet dagar som det växttillgängliga vattnet underskrider 75% minskar med ungefär 100 dagar per år mellan de två första fallen för att sedan minska mindre kraftigt med ökad storlek på det belastande området. Även för gränsen 50% ses att antalet dagar minskar då området ökas till 450 m². För simuleringarna med 650 m² och 1150 m² stora områden faller mängden växttillgängligt vatten under 50% endast en dag under hela simuleringstiden. Gränsen 25% nås endast för två av simuleringarna, den okorrigerade och för 250 m², medan gränsen 10% endast underskrids för den okorrigerade simuleringen.



Figur 13: Antalet dagar per år som vattenhalten underskrider de satta gränserna för olika stora tillrinningsområden under perioden 1991-2020.

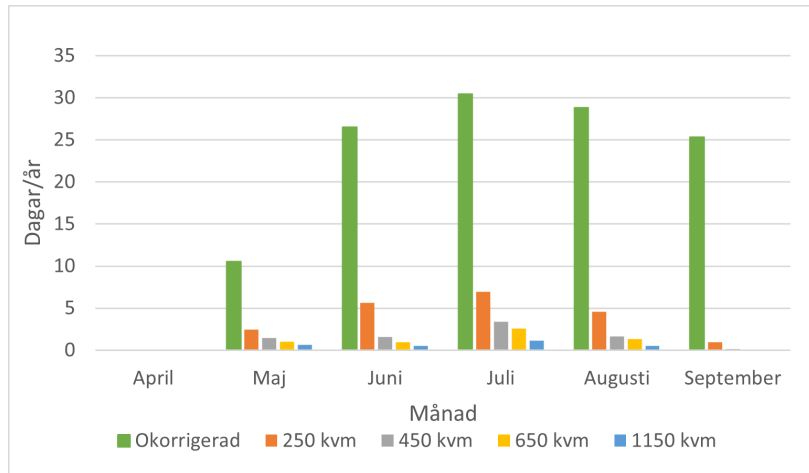
Den årliga variansen är stor för alla områdena när antalet dagar under 75% växttillgängligt vatten studeras, se figur 14. För simuleringen med den okorrigerade nederbörden ses att antalet dagar oftast pendlar mellan 110-140 dagar per år, och att det endast är tre år som underskrider 100 dagar per år. År 1997 sticker ut mest i detta avseende och detta kommer av det under sommaren 1997 inträffar två kraftiga nederbördstillfällen, det första i mitten av juni och det andra i mitten av augusti, som båda är tillräckligt kraftiga för att helt återfylla vattenmagasinet även för det okorrigerade området. Under en genomsnittssommar är nederbörd generellt sett alldeles för liten för att återfylla regnbädden och har den torkat ut tidigt under sommaren tar det ofta lång tid innan regnbädden har återfyllts om inget

extra vatten tillförs. För simuleringarna av de större områdena ses att dessa följer relativt liknande trend och att det framförallt är torra år som vattenhalten i regnbäddarna underskrider 75% VTV. För området 250 m² sticker framförallt två år, år 1999 och år 2011, ut i jämförelse med de större områdena. Anledningen till detta är att de nederbördstillfällena som inträffar under vegetationsperioden under dessa år inte är tillräckligt kraftfulla för att återfylla vattenmagasinet i regnbäddarna som de gör för de större områdena, vilket kan ses i Figur 24 & 27 i Appendix.



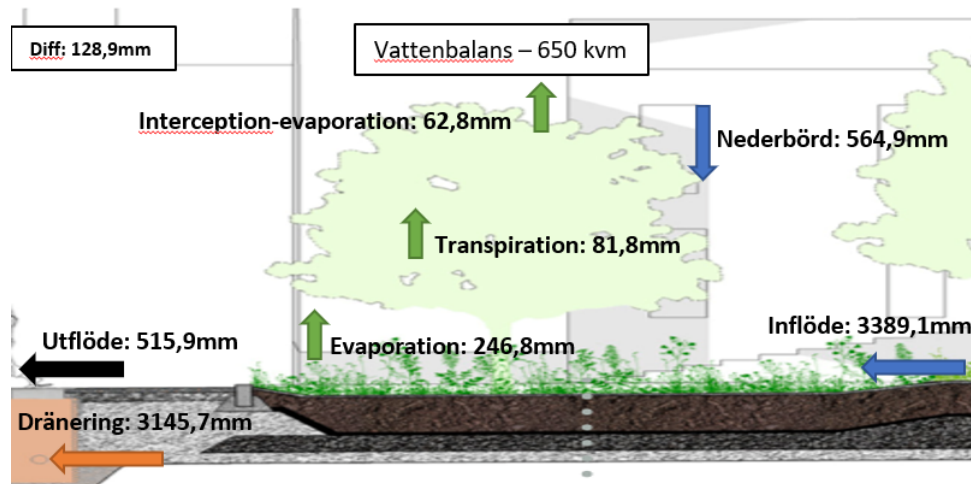
Figur 14: Årsvariationer för antalet dagar per år som vattenhalten underskrider 75% VTV för simuleringssperioden.

Om månadsfördelningen studeras, Figur 15, ses att inget scenario torkar ut under 75% VTV redan i april. För maj månad inträffar ett antal dagar per år då mängden växttillgängligt vatten underskrider 75% för alla områden, men redan i maj ses stor skillnad mellan det okorrigerade området och de större områdena. Skillnaderna mellan det okorrigerade området och de större områdena ökar sedan under sommarmånaderna och skillnaden är som störst i september. För det okorrigerade området underskrider 75% VTV under en majoritet månaderna juni-september alla dagar. Juli är den månad som flest dagar underskrider gränsen 75% VTV för alla belastande områden. För det okorrigerade området, underskrider vattenhalten i regnbäddarna 75% av VTV i genomsnitt 30,4 dagar per år. Antalet dagar som inträffar under juli månad minskar ned till ungefär 7 dagar per år då det belastande område ökas till 250 m², och minskar sedan ned till ungefär 1 dag per år för det 1150 m² stora området.



Figur 15: Antal dagar med vattenhalt under 75% VTV fördelat för månaderna under vegetationsperioden.

Vattenbalansen angivet som årsmedelvärde för simuleringsperioden för scenariot med det 650 m² stora belastande området går att se i Figur 16. Inflödet är inte en post i vattenbalansen utan har separerats från nederbörden för att representera den extra nederbörd som tillkommer i modellen, utöver den verkliga nederbörden, då nederbörden korrigerats för de olika belastande områdena. Utflödet beskriver det vatten som via ytavrinning försvinner ut ur modellområdet. Då det belastande området ökar till 1150 m² ökar inflödet till 6495,9mm vilket kompenseras av att posterna utflöde och dränering också kraftigt ökar. För evapotranspirationsposterna så ökar interceptions- och markevaporationen något då storleken belastande området ökas medan transpirationen minskar lite. För det mindre områdena minskar inflödet och därmed minskar också utflödet och dräneringen. För den okorrigerade simuleringen, då inget inflöde tillkommer, minskar dessa två poster till 13,6mm för utflödet och 246,5mm för dräneringen. För interceptions- och markavdunstningen så minskar dessa med minskad storlek på det belastande området. Medan transpirationen ökar något för simuleringen med 450 m² stora området och ytterligare en liten ökning för simuleringen med 250 m² stort område då den är som högst. Transpirationen minskar sedan i simuleringen med okorrigerad nederbörd då den erhåller det lägsta värdet för alla simuleringar. Variationen mellan transpirationen för de olika fallen ligger mellan 75,7 mm/år och 86,1mm/år.

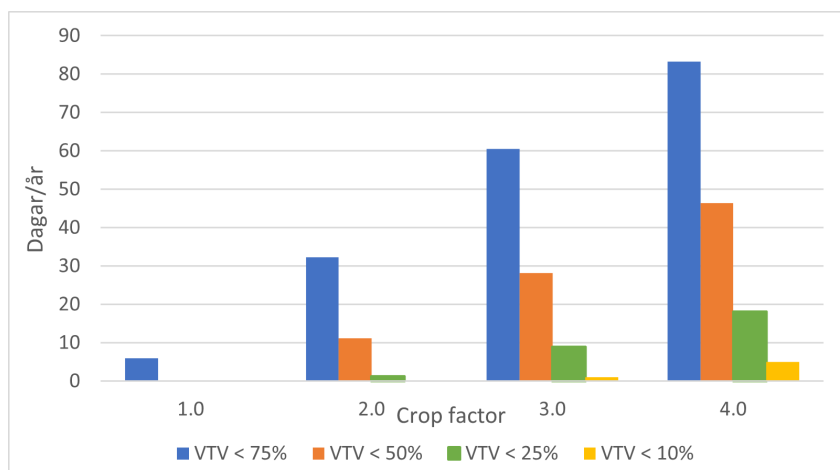


Figur 16: Årsmedelvärden för de olika posterna i vattenbalansen för det 650 m² stora tillrinningsområdet.

Att kompensera för den ökade mäktigheten på snötäcket genom att korrigera snösmältningskoefficienten resulterade i att antalet dagar med snötäcke varierade mellan 2455 och 2461 dagar under simuleringsperioden för alla simulationer. Det är framförallt den ökade snömängden som leder till att posten utflöde i vattenbalansen ökar då större belastande områden studeras.

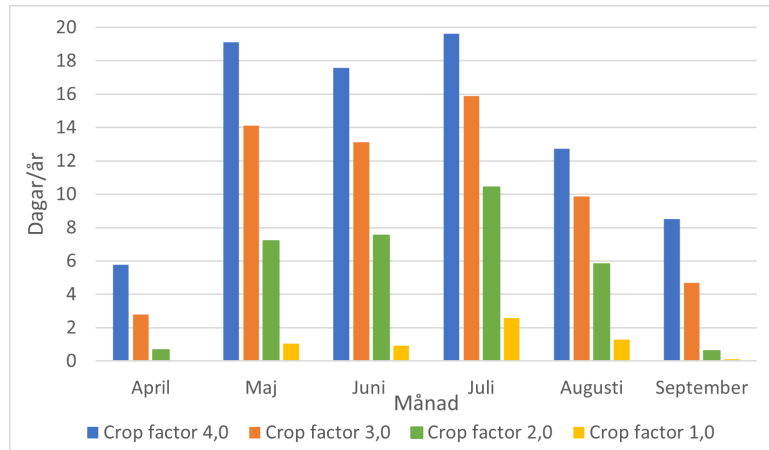
4.2 Crop factor

Resultaten från variation av crop factor (CF) visar att antalet dagar som regnbäddarna torkar ut till en viss nivå ökar med ökande crop factor, se Figur 17. Antalet dagar som regnbäddarna underskrider 75% VTV ökar från ungefär 6 dagar per år för CF 1,0 till ungefär 83 dagar per år för CF 4,0, vilket resulterar i en nästan linjär ökning av antalet dagar. Från resultat för transpirationen i modellen ses att den maximala mängd vatten som transpireras en enskild dag ökar från 2,9 mm/dag i ursprungsfallet till 5,7 mm/dag för CF 2,0. För CF 3,0 och 4,0 ökar den maximala transpirationen till 8,5 respektive 11,1 mm/dag. Trots den kraftiga ökningen av transpirationen ses för CF 2,0 att gränsen 10% aldrig underskrids och att för 25% så underskrids denna nivå i genomsnitt 1,3 dagar/år, ett genomsnitt som kraftigt höjs av de 20 dagar som denna nivå underskrids år 2018. För ytterligare höjning av CF ses en tydligare ökning av antalet dagar som underkrider även det lägre gränserna.

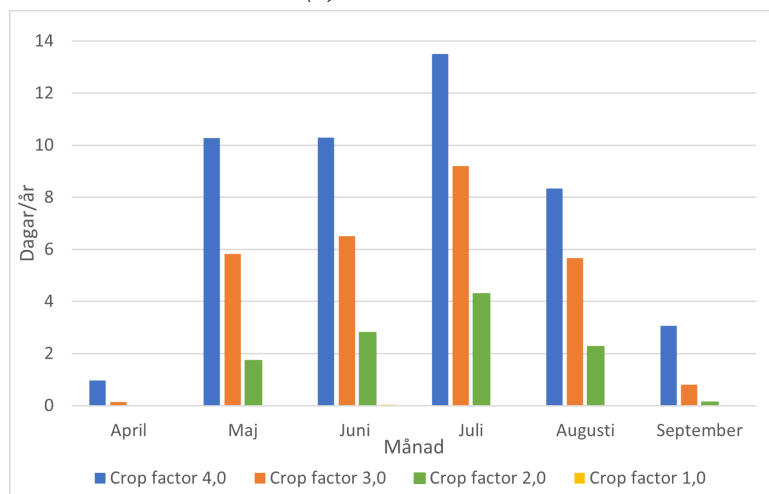


Figur 17: Antalet dagar per år som vattenhalten underskrider de satta gränserna för olika värden på crop factor under perioden 1991-2020.

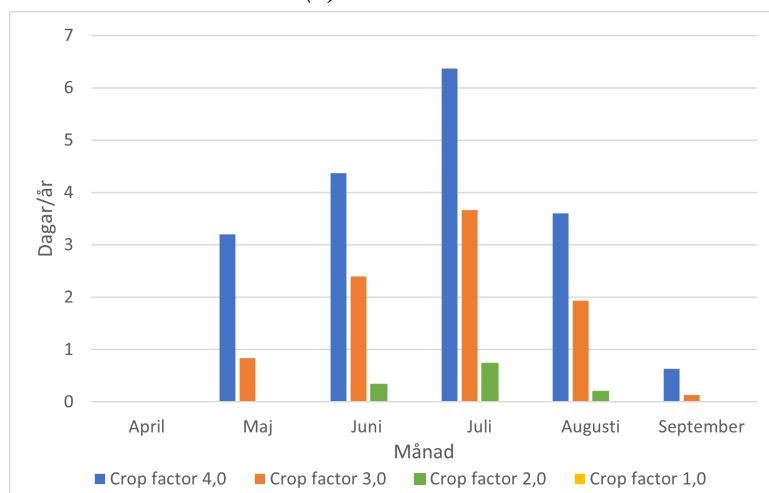
Om månadsfördelningen undersöks närmare syns att de högre värde på CF når lägre nivåer av VTV tidigare under vegetationsperioden. I Figur 18a ses månadsfördelningarna för gränsen 75%, vilken visar för CF 3,0 och 4,0 nås denna nivå oftare i maj månad än i juni. Denna trend avtar för de lägre gränserna, se Figur 18b och 18c. Vilket tyder på att även för högre CF så når regnbäddarna sällan riktigt kritiska nivåer redan tidigt på våren. För månaderna juli-september, så ses en liknande trend för alla olika delar då antalet dagar per år avtar på ett snarlikt sätt för alla värden på CF. För alla CF och avsett gräns är det vanligast att gränserna underskrids i juli månad.



(a) $VTV < 75\%$



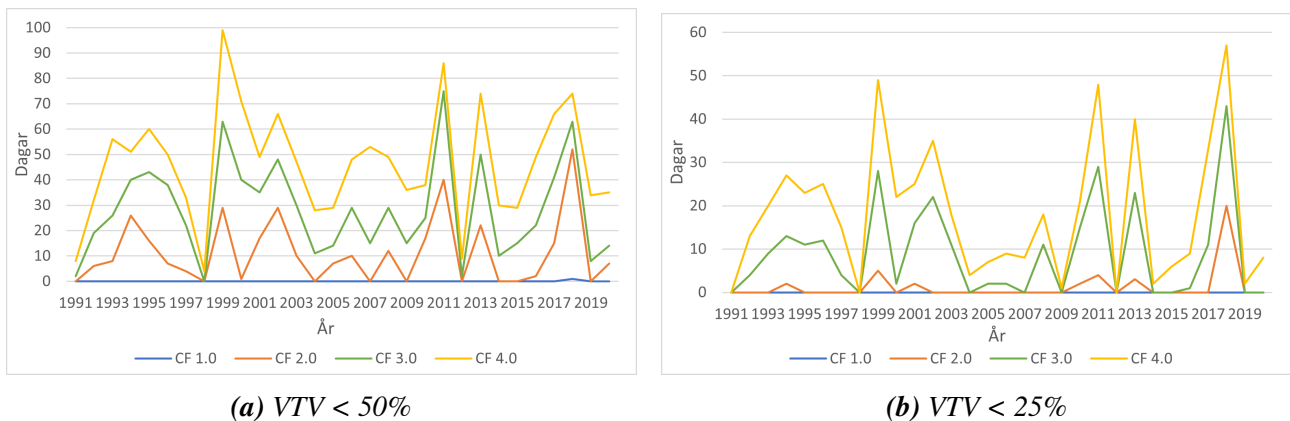
(b) $VTV < 50\%$



(c) $VTV < 25\%$

Figur 18: Antal dagar då VTV underskrider 50% och 25% under simuleringsperioden för varierande CF.

I Figur 19 redovisas årsvariationer för gränserna 50 och 25% VTV. Med CF satt till 1,0 underskrids gränsen 50% endast en dag under simuleringsperioden. Då CF ökas till 2,0 ses för gränsen 50% att det är vid erkänt torra somrar som denna gräns underskrids och för gränser 25% är det framförallt under år 2018 som den gränser underskrids i någon större utsträckning. För de högre värdena på CF ses att gränsen 50% VTV underskrids i relativt hög utsträckning de flesta år, men för den undre gränsen så ses återigen tydliga toppar i antalet dagar för erkänt torra år.

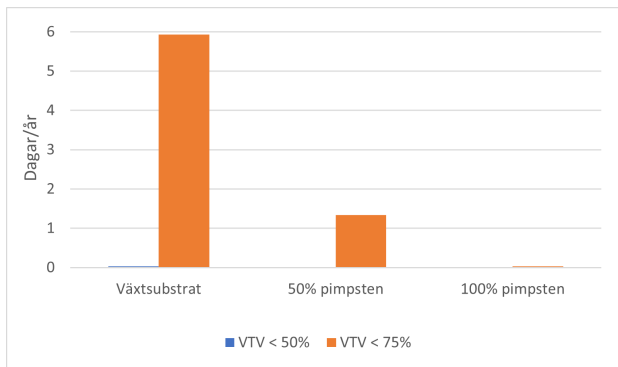


Figur 19: Antal dagar då VTV underskrider 50% och 25% under simuleringsperioden för varierande CF.

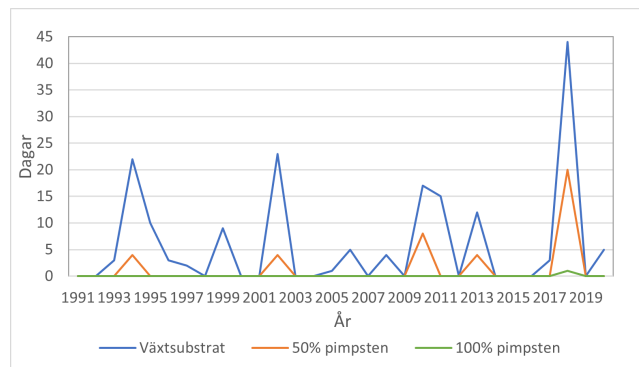
Simuleringen med CF 1,0 avser grundutförandet i denna studie och vattenbalansen för detta scenario kan ses i Figur 16. När CF ökas till 2,0 ökar även transpirationen i vattenbalansen till att på årsmedel uppgå till 180,3 mm. Vid ytterligare ökning av CF ökar transpirationen till 258,1 mm/år och sedan vidare till 302 mm/år. Denna ökning av transpirationen kompenseras i alla de fall då CF ökas med att framförallt utflödet minskar.

4.3 Växtsubstrat

Resultaten från variationen av växtsubstratets innehåll visar att det går att minska det genomsnittliga antalet dagar som det VTV underskrider 75%, med ungefär 5 dagar per år genom att ersätta hälften av makadamet med pimpsten, se figur 20a. I Figur 20b ses att det endast är 5 år som simuleringarna för 50% pimpsten underskrider 75% VTV och att reduktionen av antalet dagar jämfört med det vanliga växtsubstratet då är betydligt större. För det mest extremt torra året, 2018, minskar antalet dagar som underskrider 75% från 44 dagar för grundutförandet till 20 dagar för 50% pimpsten. Vid ytterligare ökning av mängden pimpsten så når vattenhalten under gränsen 75% VTV endast vid ett tillfälle under hela simuleringsperioden. Men som går att se i Figur 20b, så utgår denna minskningen från ett redan lågt antal dagar.



(a) dagar/år under 75% & 50%



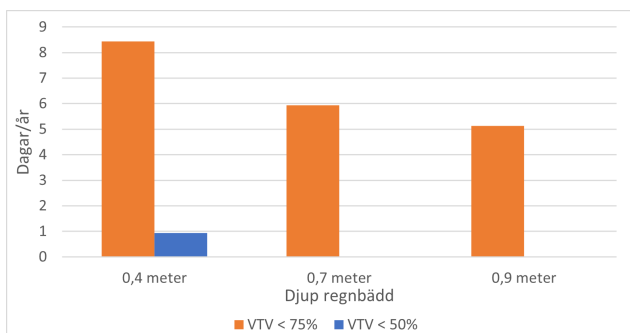
(b) VTV < 75%

Figur 20: Antal dagar per år som VTV underskrider 75% och 50% (a) och årsvariationer då VTV underskrider 75% (b) för varierande växtsubstrat.

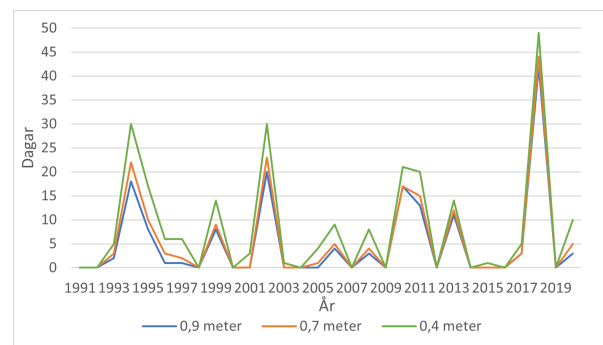
Ur vattenbalansen fås att framförallt är posterna utflöde och dränering som förändras på ett markant sätt när mängden pimpsten ökas. Utflödet minskar i jämförelse med det vanliga växtsubstratet, se Figur 16, för båda simuleringarna med pimpsten, medan dräneringen ökar i nästan samma utsträckning för båda fallen.

4.4 Regnbäddsdjup

Resultaten visar att antalet dagar som mängden VTV underskrider satta gränser ökar med minskande volym på regnbäddarna, se Figur 21a. När djupet på regnbäddarna minskas till 0,4 meter ökar antalet dagar under 75% med 2,5 dagar per år jämfört med 0,7 meter djupa regnbäddar, samtidigt som antalet dagar under 50% ökar med ungefär 1 dag per år. Då djupet på regnbädden istället ökas ses inte en lika markant minskning av antalet dagar som vattenhalten underskrider gränsen 75% VTV då reduceringen blir ungefär en dag per år. Detta se även tydligt i Figur 21b, där relativt små variationer kan ses mellan de två större regnbäddsdjupen.



(a) Dagar/år under 75% & 50%

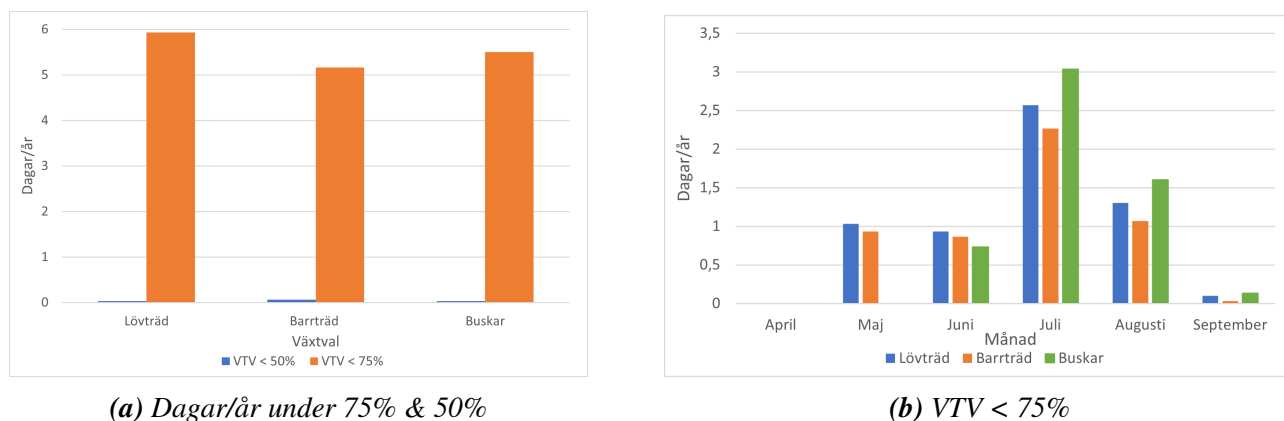


(b) VTV < 75%

Figur 21: Antal dagar per år som VTV underskrider 75% och 50% (a) och årsvariationer då VTV underskrider 75% (b) för varierande djup på regnbäddarna.

4.5 Växtval

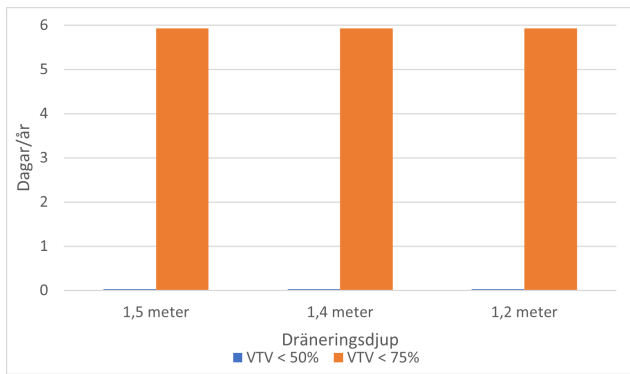
Resultaten från simuleringarna med varierande växtval visar på att lövträden torkar ut, under 75% VTV, flest antal dagar per år, se Figur 22a. Skillnaden är dock liten mellan de olika växtvalen, mindre än 1 dag per år. I Figur 22b visas hur antalet dagar då VTV är under 75% varierar för de olika månaderna under vegetationsperioden. För barr- och lövträden ses att skillnaden mellan dessa är relativt liten och de följer samma mönster. Simuleringen med buskar visar att dessa aldrig utsätts för torka under vårmånaderna, men att de istället torkar ut oftare än de andra valen under den senare delen av vegetationsperioden. Vattenbalansen för lövträden kan ses i Figur 16. I vattenbalansen för simuleringen med buskar framkommer att interceptionen minskar till 44,1 mm/år i jämförelse med vattenbalansen för lövträd, medan transpirationen ökar med 2 mm/år och markevaporationen ökar med ungefär 12 mm/år. För barrträd minskar transpirationen och markevaporationen till 55,5 respektive 234,7 mm/år, medan interceptionen ökar till 108,5 mm/år.



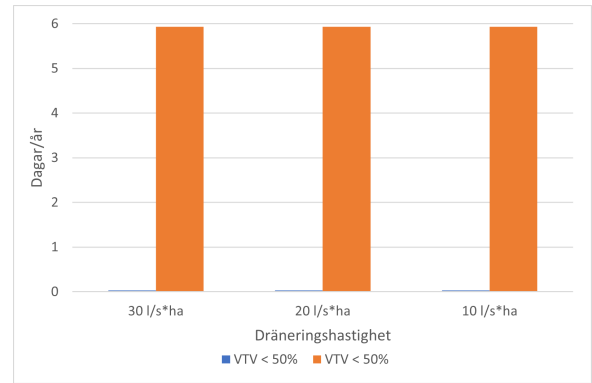
Figur 22: Antal dagar per år som VTV underskrider 75% och 50% (a) och antalet dagar per år VTV underskrider 75% fördelat på månaderna under vegetationsperioden (b) för varierande växtval.

4.6 Dräneringsdjup och dräneringshastighet

Resultaten från simuleringar med olika dräneringsdjup och dräneringshastighet, se Figur 23, visar att dessa variationer inte har någon effekt på hur vattenhalten i regnbäddarna förändras.



(a) Dräneringsdjup



(b) Dräneringshastighet

Figur 23: Antal dagar per år som VTV underskrider 75% och 50% för varierande dräneringsdjup (a) och varierande dräneringshastighet (b)

5 Diskussion

I följande avsnitt kommer modellen, antaganden som gjorts samt resultaten från denna studie diskuteras och förslag på framtida studier ges.

5.1 Utvärdering av modellen, indata och antaganden

Modellen som har satts upp beskriver det verkliga systemet på ett relativt tillförlitligt sätt utifrån de förutsättningar som ligger till grund för denna studie. De år som modellen redovisar låga nivåer av vattenhalt i regnbäddarna stämmer också överens med år som anses som torra eller år med väldigt torra sommarmånader, se avsnitt 2.4.1 och Tabell 13. För de flesta simuleringar är juli den månad då låga vattenhalter oftast inträffar, vilket också är den sommarmånad då flest längre torrperioder har inträffat under den tidsperiod som simulerats, se Figur 5. Modellens tillförlitlighet stöds även från beräkningarna av vattenbalansen för de olika simuleringarna, där evapotranspirationen ligger i linje med vad som kan förväntas för Uppsala för de flesta simuleringarna (SMHI 2021d). Ett antal antaganden och förenklingar har gjorts för att möjliggöra uppsättningen av modellen vilket bör tas i beaktning.

I ett verkligt scenario leds majoriteten av dagvattnet inom tillrinningsområdet till regnbäddarna, och i de fall då regnbäddarna är fyllda eller inte kan infiltrera dagvattnet tillräckligt fort leds överskottet till en brunn som fyller på det öppna förstärkningslagret underifrån. En förenkling som gjordes i modellen var att tillåta nederbörden att infiltrera i alla celler i modellområdet, även de områden som i ett verkligt scenario utgörs antingen av antingen dränerande hårdgjord yta eller hårdgjord yta, se Figur 7. Detta skulle eventuellt kunna resultera i att det är mindre dagvatten som faktiskt når regnbäddarna i modellen än i ett verkligt scenario, vilket leder till att resultaten i denna studie egentligen överskattar antalet dagar som regnbäddarna torkar ut under en viss given nivå. Att infiltrationen sker över hela modellområdet kan även inverka på hur stor nederbörd som krävs för att återfylla regnbäddarna efter en längre torrperiod och att denna nederbördsmängd egentligen är mindre än vad resultaten visar.

Volymen på det öppna förstärkningslagret i modellen är större än vad som planeras för i Ulleråker. Den större storleken påverkar i hur stor utsträckning det öppna förstärkningslagret fylls upp vid nederbörd, vilket skulle kunna påverka hur ofta vattennivån i det öppna förstärkningslagret når upp till regnbäddarna och skulle kunna generera extra vatten till regnbäddarna via kapillärlagring. Vid de nederbördstillfällena då detta sker kan det antas att regnbäddarna redan kommer vara mättade av det dagvatten som redan infiltrerat där. Resultaten visar även att utav det vatten som transpireras i modellen så kommer endast en mindre andel av detta från det öppna förstärkningslagret. Den, i modellen, större volymen av öppet förstärkningslager i relation till verkliga förhållande anses därför ha liten effekt på de resultat som presenteras i denna studie.

Modellområdet är uppbyggt efter utformningen på det planerade BGG-systemet, och storleken på tillrinningsområdena är därför inte inkluderat i modellen. Det gjordes därför ett antagande om att det går att korrigera nederbörden för att motsvara en viss storlek på det tillrinningsområde som regnbäddarna är tänkta att avvattna, se Tabell 9. Att korrigera denna nederbörd utifrån den nederbörd som förväntas nå regnbäddarna i det verkliga systemet kan leda till vissa felkällor. Detta antagande tillsammans med att infiltrationen sker över hela modellområdet gör att det mesta av nederbörden faktiskt kommer in i

systemet. På asfaltbeklädda ytor rinner mellan 50-90% av nederbörden vidare som ytavrinning (Armson et al. 2013) vilket betyder att en inte obetydlig del av nederbörden i ett verkligt fall aldrig når regnbäddarna i ett BGG-system. Detta skulle kunna leda till att modellen underskattar antalet dagar som regnbäddarna torkar ut under en viss nivå. Till viss del kan detta kompenseras av nederbörd som fångas upp via interception kan komma att överskattas i och med detta antagande, då de områden där interception sker utgör en stor andel av modellområdet. Då interceptionen i modellen sker i varje tidsteg och att mycket av denna nederbörd hinner avdunsta innan nästa tidsteg leder det till att mindre nederbörd når ned till markytan i dessa fall.

Valet att använda dygnsnederbörd istället för timdata för nederbörden kan ha påverkat resultatet. Då dygnsvärden används faller nederbörden jämnt fördelat över det simulerade dygnet. Detta tillåter regnbäddarna att infiltrera nederbörden under en längre tid, vilket kan ge ett realistiskt utfall på hur mycket nederbörd som faktiskt infiltrerar in i regnbädden. Detta skulle kunna leda till att modellen underskattar antalet dagar som regnbäddarna upplever låg nivå av vattenhalt. Detta val leder också till att mer nederbörd kommer fångas upp av interception och avdunsta från träd Kronorna. Vilket skulle kunna leda till eventuella fel i hur mycket vatten som når regnbäddarna.

Att använda medelvärden på den potentiella evapotranspirationen är en felkälla som kan ha påverkat resultatet i denna studie. Evapotranspirationen varierar dagligen och att använda ett medelvärde kan då underskatta hur mycket vegetationen transpirerar under varma och torra perioder samtidigt som det överskattar detsamma under kallare perioder. Resultaten visar att modellen lyckas fånga upp de år som anses torra och ger utslag för låga vattenhalter under dessa år, men med den indata som använts finns det en risk att modellen underskattar amplituden av förändringarna i vattenhalten. De värden som använts i denna studie är beräknade utifrån meteorologisk data för åren 1961-1978, då Uppsala har blivit betydligt varmare sedan dess finns det risk att dessa månadsvärden är något lägre än vad som egentligen var fallet för den simulerade perioden. Vilket skulle ge upphov till ytterligare en felkälla i resultaten. I framtida projekt bör därför beräknade värden för den period som simuleras användas.

Det fanns ingen information om växtsubstratens retentionskurvor tillgängliga vid tidpunkten för denna studie. Endast information om porositet och mängden växttillgängligt vatten fanns för växtsubstratet utan pimpsten och information om pimpsten porositet. Retentionskurvor för alla de olika växtsubstraten har därför uppskattas utefter liknande jordarter, se avsnitt 3.2.3. Detta antagande är en potentiell stor felkälla som kan påverka resultaten, då denna information har stor inverkan på hur och när vattenhalten förändras i regnbäddarna.

5.2 Olika parametrars effekt på BGG-systems motståndskraft mot torka

Ett av målen med denna studie var att undersöka vilka parametrar som har störst inverkan på BGG-systemens motståndskraft mot torrperioder och vad som kan göras för att förbättra systemen.

Olika storlekar på det området som belastar BGG-systemet med dagvatten simulerades för att undersöka vilken effekt detta får på vattenhalten i regnbäddarna. I de simuleringar som genomfördes motsvarar vegetationen en sammanlagd kronarea på 104 m², vilket ger en kvot mellan jordvolymen och kronarean på ungefär 0,7 m³/m². Denna kvot är högre än vad tidigare studier föreslagit som

rekommenderade växtbäddsvolymer, se avsnitt 2.3.6. Även fast denna kvot är relativt hög så torkar regnbädden ut till under 10% VTV i genomsnitt 9 dagar per år, och under 17 av de 30 år som simulerats är det minst en dag som denna nivå nås, om inget dagvatten tillförs. Antalet år som regnbäddarna når denna nivå av uttorkning är något högre än de resultat som DeGaetano (2000) presenterar, även om både jordens vattenhållande förmåga och kvoten mellan jordvolym och trädkrona är högre i denna studie. Studierna avser dock två helt olika geografiska områden vilket påverkar variationen i resultaten, och även variationen i ekvationen för transpirationen antas ha en inverkan på resultaten.

Då storleken på tillrinningsområdet ökas ses en klar förbättring av vegetationens vattentillgång och redan vid ett tillrinningsområde motsvarande 450 m² underskreds aldrig gränsen 25% VTV under perioden 1991-2020, och för de två största tillrinningsområdena underskreds gränsen 50% VTV endast en gång under hela simuleringsperioden. Anledningen till detta är att det krävs mindre nederbördsmängder för att återfylla regnbäddarna ju större tillrinningsområdet är. Den yta där transpirationen sker är i dessa simuleringar relativt liten sett till hur stora träd kan bli vilket bör beaktas. Resultaten visar på vikten av att tillföra extra vatten till de träd som planeras i stadsmiljö. Större träd än det som har simulerats i detta fall skulle således nått kritiskt låga nivåer ännu oftare än vad resultaten i denna studie visar. Vattenbalansen från simuleringarna med tillrinningsområden i olika storlekar visar att den årliga transpirationen är högst då tillrinningsområdet motsvarar 250 m². Detta tros bero på att vattenhalten för detta fall inte lika ofta når över fältkapacitet som de gör för de större områdena. Då vattenhalten ligger på nivåer över fältkapacitet påverkar det transpirationen i modellen negativt och detta inträffar oftare ju större tillrinningsområdet är. Detta visar också på att ju större områden och mer dagvatten som leds till regnbäddarna desto oftare kommer de även utsättas för mättade förhållanden vilket även det kan påverka träden negativt. Vilket understryker vikten av att välja trädarter som är tåliga för både torra och mättade vattenförhållanden.

Genom att öka mängden pimpsten i växtsubstratet går det att kraftigt minska antalet dagar som vegetationen utsätts för torka. Under den torraste perioden, år 2018, minskar antalet dagar under 75% VTV med ungefär 55%, då mängden växttillgängligt vatten fördubblades från 20 till 40% av den totala jordvolymen. Att ytterligare öka mängden växttillgängligt vatten medför att samma nivå underskreds endast under ett tillfälle under hela den simulerade tidsperioden. I de fall som simulerades för varierande växtsubstrat är den totala kronarean relativt liten och vattenhalten når därför aldrig ned till riktigt kritiska nivåer ens för scenariot med vanligt växtsubstrat. I denna studie har det inte undersökts om samma effekt kan erhållas med simuleringar för större kronareor, men det går att anta att även i de fallen skulle en ökad mängd växttillgängligt vatten ha en positiv inverkan. I denna studie har ett antagande gjorts om att det växttillgängliga vattnet kan ökas från 20% upp till 60% om allt makadam ersätts med pimpsten. Detta antagande har gjorts utifrån pimpstens materiella egenskaper, porositet och vattenhållande förmåga. Att faktiskt erhålla en nivå av växttillgängligt vatten på 60% kan dock anses vara orealistiskt högt. För att förbättra simuleringarna, och kunna göra en mer exakt analys av pimpstenens förbättrade potential, bör den faktiskt ökningen av växtsubstratets vattenhållande förmåga undersökas för ett antal fall med olika fraktioner av tillsatt pimpsten. Att utöka mängden växttillgängligt vatten visar sig dock vara effektivt för att förbättra situationen för vegetationen i regnbäddarna. Då det redan vid en ökning från 20 till 40% växttillgängligt vatten erhålls betydligt bättre vattentillgång i regnbäddarna. Då vattenhalten i inget av de simulerade fallen inte når ned till riktigt kritiska nivåer, föreslås tillförsel av pimpsten i växtsubstratet först vara nödvändigt vid plantering av större träd eller då många träd planteras i samma regnbädd.

Variationen av djupet på regnbädden visar att antalet dagar som vegetationen utsätts för torka minskar med ökat djup och volym på regnbäddarna. Förbättringen är dock relativt liten sett till ökningen av volymen i regnbäddarna, då en ökning av djupet på 50 cm endast minskar antalet dagar under 75% VTV med i genomsnitt ungefär 3 dagar/år. Från resultaten, Figur 21a, ses att minskningen är störst då djupet varierar mellan 0,4 och 0,7 meter och att minskningen för ett ytterligare större djup är betydligt mindre. Detta beror delvis på hur rotfördelning i djupprofilen är inställd i modellen. Med det valda värdet på parametern A_{root} , se Tabell 11, kommer mer av det vattnet som transpireras tas från de översta beräkningslagren. Och då den kapillära upptransporten är försumbar mellan det öppna förstärkningslagret och regnbäddarna påverkar det mer i regnbäddarna som är minst djupa. Detta gör det även svårt att dra några säkra slutsatser om hur effektivt det är att variera djupet på växtbäddarna. Den förbättring som ses genom att öka djupet på regnbäddarna är relativt liten sett till andra parametrar som har undersökts i denna studie. Detta tyder på att den extra volymen vatten som regnbäddarna har kapacitet att hålla då regnbäddarna görs djupare kommer förbrukas relativt fort under torra perioder och har mindre effekt än att exempelvis öka det växttillgängliga vattnet med ett förbättrat växtsubstrat.

Resultaten från variationen av växtval visar på små förändringar i vattenhalten och antal dagar den underskrider de satta gränserna. Däremot visar valet av växter på vissa känsligheter i de transpirationsparametrar som används i modellen. För simuleringarna med lövträd och buskar varierar rotdjupet, LAI och transpirationskonstanten C_1 . Vattenbalansen för de båda simuleringarna visar att LAI har stor effekt på mängden nederbörd som fångas upp och avdunstar genom interception, medan det tycks ha en mindre effekt på mängden vatten som transpireras i modellen. Resultaten visar även effekten som det varierande rotdjupet. Mer vatten transpireras från de områden som har varit i fokus i denna studie vid simuleringar med buskar, vilket gör att dessa torkar ut fler gånger under sommarmånaderna juli och augusti. Vilket även är tydligt vid jämförelse mellan barrträd och buskar. De växtval som har kunnat utnyttjas i denna studie bygger på empiriska stödda antaganden om hur evapotranspirationen sker från större områden med dessa växter. Detta är inte helt realistiskt sätt till hur ett verkligt BGG-system är utformat och det går inte utifrån resultaten i denna studie att säga något om valet av växter kommer påverka vattentillgången.

Varken djupet på dräneringen eller med vilken hastighet vattnet dräneras bort med visar sig ha någon inverkan på hur vattenhalten i regnbäddarna förändras. Detta tros bero på att endast en mindre del av det vatten som når regnbäddarna perkolerar ned i det öppna förstärkningslagret där det kan dräneras bort. Variationen har heller ingen större effekt på evapotranspirationsposterna i vattenbalansen. Att öka mängden vatten som är kvar i det öppna förstärkningslagret efter ett nederbördstillfälle skulle i ett verkligt scenario kunna gynna träden. Av det vatten som transpireras i modellen kommer majoritet från det vatten som finns i regnbäddarna beroende på de parameterinställningar som gjorts. Det är därför rimligt att dessa variationer inte har någon effekt på de delar av BGG-systemet som har varit i fokus under denna studie. Att minska dräneringshastigheten skulle kunna hålla kvar mer vatten i det öppna förstärkningslagret efter ett nederbördstillfälle. Men det går inte från resultaten i denna studie att dra några slutsatser om hur dessa förändringar i systemet förbättrar trädens vattentillgång.

Det har i denna studie gjorts ett försök att kunna koppla en viss storlek på träd till hur ofta de kommer utsättas för torka. I modellen simuleras transpirationen från ett specificerat antal träd med en sammanlagd kronarean på 104 m^2 , samma yta som utgör regnbäddarna. Detta är mindre än den,

av Edge, uppskattade kronarean (209 m^2) som träden i Ulleråker förväntas uppnå. Det är inte möjligt att koppla resultaten i denna studie till storleken på ett specifikt träd, men resultaten tyder på att det går att koppla till storleken på en sammanlagd kronarean av ett antal träd. I grundutförandet med CF 1,0 transpireras som mest 2,9 mm/dag, vilket ger en vattenförbrukning på 2,9 liter/ m^2 trädkrona. Detta är något mindre än de teoretiska värden som Edge räknat med (4,2 liter/ m^2) vid dimensionering av regnbäddarna och de värden som presenterades i Tabell 1, där vattenförbrukningen är ungefär 3,8 l/ m^2 . Den nivå av transpirationen som sker i modellen anses ändå realistiskt utifrån det faktum att de beräknade värdena bygger på antaganden om optimala transpirationsförhållanden. Då CF ökas ökar även den maximala dagliga transpirationen. Den faktor som den maximala transpirationen ökar med är dock inte fullt lika hög som den faktor som CF ökas med, och avtar ju högre CF som simulerats. Detta anses vara ett rimligt utfall då större träd skulle ha en större intern skuggning samt högre luftfuktigheten i trädkronan vilket minskar den faktiska transpirationen.

Genom att öka CF till 2 skulle således dessa simuleringar kunna motsvara en kronarean för ett ospecificerat antal träd som är dubbelt så stor som regnbäddarnas utbredning i modellen. Vilket motsvarar den storleken av trädkronorna som är förväntad i Ulleråker. Resultaten visar att träd av denna storlek sällan når kritiska låga nivåer av vattenhalt med det valda belastande området. År 2018 är, som går att se i 19b, ett undantag då vattenhalten underskrider 25% VTV under 20 dagar av vegetationsperioden. Det talar för att de träd som planteras i Ulleråker kommer kunna uppnå den storlek som Edge har räknat med, utan att utsättas för kritiskt låga halter VTV med det system som är planerat. Vid simuleringarna med högre CF så utsätts träden för låga vattenhalter betydligt oftare och under längre tid. De träd som planteras i Ulleråker, "*Tilia Cordata Rancho*", når teoretisk en maximal kronarean på 38 m^2 per träd och de 11 träden i Ulleråker skulle då kunna nå en sammanlagd kronarean på 418 m^2 . Om CF 3,0 och 4,0 kan förväntas motsvara 75% och 100% av trädens teoretiskt maximala storlek så visar resultaten att dessa utsätts för vattenhalter under 25% VTV en majoritet av de simulerade åren, se Figur 19b. För att träden ska uppnå denna storlek skulle ytterligare vatten behöva göras åtkomligt, antingen genom att utöka tillrinningsområdet eller öka det växttillgängliga vattnet i regnbäddarna genom inblandning av pimpsten i växtsubstratet. En alternativ lösning är också att plantera färre träd i regnbäddarna och att dessa istället tillåts nå en större enskild kronarean.

5.3 Hur bör BGG-system dimensioneras i framtiden

Ett mål med denna studie var att undersöka vilka metoder som finns för att dimensionera växtbäddar och om BGG-system måste anpassas för ett framtida klimat.

Undersökningen av torra och torrperioder i Uppsala visar att den längsta torrperioden som årligen inträffar under vegetationsperioden i genomsnitt inte har förändrats speciellt mycket sedan 1931, se Figur 3. Inte heller har andelen torrperioder som överskrider 15 dagar förändrats nämnvärt under perioden och utgör endast 5% av alla torrperioder för referensperioden 1991-2020. Det finns heller inte, till författarens bästa vetande, några scenarier för framtiden som tydligt visar på att torrperioderna förväntas bli längre. Det skulle därmed kunna anses rimligt att dimensionera BGG-systemen vegetationsytorna och regnbäddarna för att klara av att självhushålla med vatten i upp till 15 dagar. Ett antal faktorer bör dock tas i beaktning. Det beräkningssätt som har använts för dimensionera växtbäddar på detta sätt, se avsnitt 2.3.6, bygger på att de återfylls helt av den nederbörd som faller på området. För att

återfylla en uttorkad regnbädd krävs enligt modellberäkningarna drygt 20 mm nederbörd under loppet av några dagar, om tillrinningsområdet är 650 m² stort. Ifall inget ytterligare vatten tillförs utöver det som faller över regnbäddarna är denna nedbörds mängd betydligt högre. Att dimensionera regnbäddar utifrån längden på en viss frekvent torrperiod betyder därmed inte att träden inte kommer utsättas för torka. Det ska dock till relativt stora träd eller ett litet tillrinningsområde för att regnbäddarna ska nå ner till denna nivå utifrån resultaten i denna studie. Dagar med kraftig och extrem nederbörd har historiskt sett inträffat i genomsnitt 5 dagar per år under sommarmånaderna (juni-aug), se avsnitt 2.4.1. Det skulle anses rimligare att dimensionera regnbäddarna utifrån frekvensen av dessa nedbördsstillfällen. Om vi utgår från att dessa tillfällen är jämt fördelade över månaderna skulle regnbäddarna behöva klara av att självhushålla med vatten i 18-19 dagar om tillrinningsområdet är ungefär 5 gånger så stort som ytan på regnbäddarna.

Som tas upp i avsnitt 2.3.6 så är intervallet för växtbäddars rekommenderade volym stort. I de flesta simuleringar i denna studie är kvoten mellan den jordvolym där träden kommer ha tillgång till vatten och kronarean ungefär 0,7. Detta är större än vad ett antal tidigare studier föreslår, och trots detta måste tillrinningsområdet göras i storleksordning 2-3 gånger större än ytan av regnbäddarna för att inte gränsen 10% VTV ska underskridas, och 4-5 gånger så stort om gränsen 25% inte ska underskridas. För simuleringarna med CF 2,0, som antas kunna motsvara en dubbelt så stor kronarea, blir kvoten mellan jordvolym och trädkrona istället ungefär 0,35. Med ett 650 m² stort tillrinningsområdet underskrids gränsen 25% framförallt under det exceptionellt torra året 2018. Förslagsvis bör kvoten ligga någonstans inom detta intervallet för att erhålla en adekvat mängd vatten, vilket ligger i linje med den volym Vrecenak och Harrington samt Bakker förelår, se Figur 1, och den volym som ges av ekvation 2. Då det i gaturummet inte alltid finns utrymme att anlägga så stora regnbäddar skulle förslagsvis färre träd kunna planteras. Vilka skulle potentiellt tillåtas nå en enskilt större storlek än då fler träd planteras i samma regnbäddar.

Med i åtanke bör även framtida temperaturökningar vara vid plantering av träd i stadsmiljö. Medeltemperaturer för Uppsala blev under den senaste referensperioden 1,5°C varmare än för perioden 1961-1990. En temperaturökning som förväntas bli 3-5°C varmare än samma referensperiod mot slutet av århundradet. Denna temperaturökning leder troligtvis även till en högre evapotranspiration vilket påverkar trädens vattenförbrukning och hur lång tid de klarar sig utan nederbörd. Detta stödjer idén om att hålla en högre kvot av jordvolym per kronarea, än vad många av de rekommendationer i avsnitt 2.3.6 gör.

5.4 Framtida studier

För att förbättra och säkerställa resultaten i denna studie bör den faktiska förändringen av vattenhalten i ett BGG-systems regnbäddar undersökas under vegetationsperioden. Om detta genomförs i kombination med mätningar av kronarean för de träd som är planterade där skulle det ge ett underlag för att kunna kalibrera modellen och således generera bättre resultat i framtida studier.

Det finns några potentiella förbättringar av modellen som bör undersökas närmare för framtida studier. Om modellområdet skulle kunna utökas för att motsvara det tillrinningsområde som faktiskt belastar regnbäddarna, istället för att endast motsvara utbredningen av BGG-systemet, skulle eventuella fel

baserade på den korrigerade nederbörd som genomförts i denna studie elimineras. En ytterligare förbättring av modellen skulle vara att göra det översta lagret, i de områden som inte utgör regnbäddar, impermeabla. Detta skulle göra att dagvatten endast tillåts infiltrera i regnbäddarna och ger därmed en bättre representation av hur vattenhalten kommer förändras. Det skulle även leda till att de vattenförluster som nu sker via markavdunstningen i modellen undvikas. Det skulle medföra att säkrare resultat erhålls kring vilken nederbördsmängd som krävs för att återställa vattenhalten i regnbäddarna och därigenom erhålla en nederbördsfrekvens som regnbäddarna skulle kunna dimensioneras utifrån.

En undersökning där växtsubstratens retentionskurvor fastställs skulle behöva genomföras för att ytterligare kunna säkerställa och förbättra resultaten i denna studie.

I denna studie har ingen hänsyn tagits till hur ett framtida klimat skulle kunna påverka stadsträd i BGG-system. I ett nästa steg hade det därför varit av intresse att undersöka hur ett varmare klimat med fler extrema väderhändelser och eventuellt högre evapotranspiration påverkar träd i stadsmiljö.

5.5 Summering

Resultaten i denna studie visar att den viktigaste aspekten för att undvika att träden utsätts för torka är att dimensionera för ett tillräckligt stort tillrinningsområde. Men en ökning av storleken på tillrinningsområdet kommer även leda till att antalet dagar som träden utsätts för mättade förhållanden kommer öka. Detta ställer krav på att plantera träd som är motståndskraftiga mot både eventuellt torra och vattenmättade förhållanden. Resultaten visar också att planteringar med trädkronor motsvarande ungefär 200 m² sällan utsätts för kritiska nivåer av torka under förutsättning att tillrinningsområdet är ungefär 7 gånger så stort som storleken på regnbäddarna de planteras i. För plantering av större träd eller i de fall det belastande området inte kan utökas ännu mer är pimpsten ett effektivt sätt att förbättra situationen för träden.

Resultaten i denna studie visar även att många av de beräkningsmetoder som finns för att dimensionera växtbäddar inte erhåller en tillräcklig volym för att undvika att träden utsätts för torka. Att dimensionera växtbäddar för att kunna klara av en visst lång torrperiod anses därför inte vara ett optimalt tillvägagångssätt. Förslagvis bör kvoten mellan jordvolym och trädkrona vara i intervallet 0,35-0,7 under förutsättning att tillrinningsområdet är i storleksordningen 4-7 gånger större än ytan på regnbäddarna. Är kvoten mindre än 0,35 bör detta kompenseras med ett ännu större tillrinningsområde eller ökad mängd växttillgängligt vatten. Resultaten talar därmed för att det enklaste sättet att dimensionera växtbäddar på, se ekvation 2, också är det som ger den mest adekvata volymen, men också att det går att kompensera för mindre volymer genom att öka tillrinningsområdet.

Majoriteten av simuleringar, oavsett utformning, visar att det är vanligast att låga nivåer av vattentillgång inträffar under juli månad och att det då oftast sker under år som allmänt anses torra. Resultaten visar också att låga vattennivåer framförallt nås under månader med långt under normal nederbörd. Utifrån ett historiskt perspektiv kan det konstateras att det kan behövas stödbevattning under perioder som är extremt torra och att detta oftast inträffar under juli månad. Då det är bättre att förekomma torkan kan eventuell stödbevattning av regnbäddarna behövas under perioder med långt under normal nederbörd och då ingen ytterligare nederbörd är att förvänta under den närmsta framtiden. För större

träd, eller desto fler träd som är planterade i systemen, kommer bevattningsbehovet att öka och då framförallt tidigare under vegetationsperioden.

Modellen är ett bra första steg för att bättre förstå stadsträdens situation kopplat till vattentillgång. Däremot måste fler undersökningar genomföras så att modellen kan kalibreras för att kunna erhålla bättre och säkrare resultat.

6 Slutsats

Denna studie har haft ett antal frågeställningar som besvarats. Ett av dessa var att undersöka vilka metoder det finns för att dimensionera växtbäddar. Det finns ett antal sätt att beräkna eller uppskatta en adekvat växtbäddsvolym. Resultaten i denna studie visar dock att majoriteten av dessa inte genererar en tillräcklig stor volym för att träden ska klara sig om inget extra vatten tillförs. Det är därför en nödvändighet att aktivt leda extra vatten till träd och vegetation i våra gaturum.

Ett ytterligare mål var att undersöka hur BGG-system bör dimensioneras för att bättre klara ett framtida klimat. Det finns idag inget som tyder på att torrperioder kommer bli längre i framtiden och inte heller kommer antalet torra dygn förändras nämnvärt. Den ökade intensiteten på nederbörden som förväntas i framtiden bör kunna gynna träden i BGG-system då vattentillgången förbättras, med reservation för att ingen hänsyn tagits i denna studie för ökad temperatur och ökad evapotranspiration. Ett system som är adekvat dimensionerat för dagens klimat bör således ha en god chans möta framtidens klimat.

Ett annat mål var att undersöka hur väl det går att simulera BGG-system i MIKE SHE och vilka faktorer vid dimensionering av BGG-systemens som har störst inverkan på systemets motståndskraft mot torka. Resultaten visar att modellen är ett bra första steg för att bättre kunna förstå hur stadsträd klarar av torra perioder under vegetationsperioden. Men resultaten i denna studie ska i första hand ses som en uppskattning av vilka parametrar som är viktiga för att motverka torka på stadsvegetationen. De faktorer som har störst inverkan för att erhålla en adekvat vattenhalt inom BGG-system är följande.

- Storleken på tillrinningsområdet.
- Kvoten mellan volym regnbädd och kronarea.
- Mängden växttillgängligt vatten.

Storlek på tillrinningsområdet har störst inverkan på vattenhalten och bör vara minst 7 gånger så stort som ytan av regnbäddarna för att kunna tillgodose vegetationen med en adekvat mängd vatten. Samtidigt bör kvoten mellan volym växtbädd och kronarea vara inom intervallet $0,35-0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ under förutsättning att tillrinningsområdet är lämpligt dimensionerat. I de fall tidigare nämnda kriterier inte kan uppfyllas eller då stora träd planteras bör pimpsten tillsättas i växtsubstratet.

7 Referenser

Publicerade

- Amoah-Antwi, C., J. Kwiatkowska-Malina, S. F. Thornton, O. Fenton, G. Malina & E. Szara (20 juni 2020). Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review. *Science of The Total Environment* 722, s. 137852. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137852.
- Anderegg, L., W. Anderegg & J. Berry (22 juli 2013). Not all droughts are created equal: Translating meteorological drought into woody plant mortality. *Tree physiology* 33. DOI: 10.1093/treephys/tpt044.
- Armson, D., P. Stringer & A. R. Ennos (1 jan. 2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening* 12.3, s. 282–286. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.04.001.
- Attia, Z., J.-C. Domec, R. Oren, D. A. Way & M. Moshelion (1 juli 2015). Growth and physiological responses of isohydric and anisohydric poplars to drought. *Journal of Experimental Botany* 66.14, s. 4373–4381. DOI: 10.1093/jxb/erv195.
- Brunner, I., C. Herzog, M. A. Dawes, M. Arend & C. Sperisen (2015). How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science* 6, s. 547. DOI: 10.3389/fpls.2015.00547.
- Bühler, O., P. Kristoffersen & S. Ugilt Larsen (2007). Growth of Street Trees in Copenhagen With Emphasis on the Effect of Different Establishment Concepts. *Arboriculture and Urban Forestry* 33.5, s. 330–337.
- Chen, D., P. Zhang, K. Seftigen, T. Ou, M. Giese & R. Barthel (17 nov. 2020). Hydroclimate changes over Sweden in the twentieth and twenty-first centuries: a millennium perspective. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. Publisher: Taylor & Francis.
- Coder, K. & D. Warnell (1999). *Drought damage to trees*. University of Georgia: School of forest resources.
- Cregg, B. (1 jan. 1995). Plant Moisture Strees Of Green Ash Trees In Contrasting Urban Sites. *Journal of Arboriculture* 21.
- David, A. A. J., A. Boura, J.-C. Lata, A. Rankovic, Y. Kraepiel, C. Charlot, S. Barot, L. Abbadie & J. Ngao (1 febr. 2018). Street trees in Paris are sensitive to spring and autumn precipitation and recent climate changes. *Urban Ecosystems* 21.1, s. 133–145. DOI: 10.1007/s11252-017-0704-z.
- David, T. S., J. H. C. Gash, F. Valente, J. S. Pereira, M. I. Ferreira & J. S. David (2006). Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes* 20.13. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.6062>, s. 2713–2726. DOI: 10.1002/hyp.6062.
- Deak Sjöman, J. & J. Östberg (2020). *i-Tree Sverige : för strategiskt arbete med trädets ekosystemtjänster*. Report 2020:13. ISBN: 9789157689894 Issue: 2020:13 Num Pages: 176.
- DeGaetano, A. T. (2000). Specification of soil volume and irrigation frequency for urban tree containers using climate data. *Journal of Arboriculture* 26.3. Publisher: International Society of Arboriculture, s. 142–151.
- Di, L. & Q. Chaoqian (juli 2009). "Influence on Rainfall Run-Off Due to Urbanization in Wuhan City of China". *2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. Vol. 2, s. 182–184. DOI: 10.1109/ESIAT.2009.442.

- Dobson, M. (juni 1995). *Tree root systems*. 130/95/ARB. Farnham: Arboricultural Advisory och Information Service.
- Donovan, G. H., D. T. Butry, Y. L. Michael, J. P. Prestemon, A. M. Liebhold, D. Gatzliolis & M. Y. Mao (1 febr. 2013). The Relationship Between Trees and Human Health: Evidence from the Spread of the Emerald Ash Borer. *American Journal of Preventive Medicine* 44.2, s. 139–145. DOI: 10.1016/j.amepre.2012.09.066.
- Ericsson, T. (2009). *Växtbiologi*. Täby: Riksförbundet Svensk Trädgård.
- Eriksson, B. (1981). *Den Potentiella"evapotranspirationen i Sverige*.
- Eriksson, B. (jan. 1986). *Nederbörds- och humiditetsklimat i Sverige under vegetationsperioden*. SMHI.
- Fransson, A.-M., M. Gustafsson, J. Malmberg & M. Paulsson (2020). *Biokolhandboken - för användare*.
- Grabosky, J. & N. Bassuk (1 jan. 1995). A new urban tree soil to safely increase rooting volumes under sidewalks. *Journal of Arboriculture* 21.
- Grip, H. & A. Rhode (1994). *Vattnets väg från regn till bäck*. 3. utg. Hallgren och Fallgren. 155 s.
- Gudmundsson, L. & S. I. Seneviratne (1 april 2016). Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe. *Environmental Research Letters* 11.4, s. 044005. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/044005.
- Guevara-Escobar, A., E. González-Sosa, C. Véliz-Chávez, E. Ventura-Ramos & M. Ramos-Salinas (15 febr. 2007). Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benjamina* tree in an urban area. *Journal of Hydrology* 333.2, s. 532–541. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.017.
- Johansson, A. & A. Edman (2018). *Klimatförändringarnas påverkan på vattenresurser i Uppsala län*. text 2018-45. SMHI.
- Killicoat, P., E. Puzio & R. Stringer (sept. 2002). The economic value of trees in urban areas: estimating the benefits of Adelaide's street trees. In Proceedings Treenet Symposium (Vol. 94, p. 106). 94, s. 106.
- Kim, H., J. D. Miller, T. R. Kjeldsen, J. Packman, S. Grebby & R. Dearden (16 juli 2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology* 515, s. 59–70. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.011.
- Kjellström, E., G. Strandberg & L. Changgui (mars 2021). *Förändringar i klimatet som påverkar energisektorn i Sverige*. 2021_745. Energiforsk.
- Klingberg, J., M. Broberg, B. Strandberg, P. Thorsson & H. Pleijel (dec. 2017). Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure – A case study in Gothenburg, Sweden. *Science of The Total Environment* 599-600, s. 1728–1739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.051.
- Larchevêque, M., M. Maurel, A. Desrochers & G. R. Larocque (1 mars 2011). How does drought tolerance compare between two improved hybrids of balsam poplar and an unimproved native species? *Tree Physiology* 31.3. Publisher: Oxford Academic, s. 240–249. DOI: 10.1093/treephys/tpr011.
- Lindsey, P. & N. Bassuk (1 febr. 1992). Redesigning the urban forest from the ground below: A new approach to specifying adequate soil volumes for street trees. *Arboricultural Journal* 16. DOI: 10.1080/03071375.1992.9746896.
- Lindsey, P. & N. Bassuk (1 jan. 1991). Specifying soil volumes to meet the water needs of mature urban street trees and trees in containers. *Journal of Arboriculture* 17.

- Lizell, A. (2021). "Vad gör en växt torktålig – Fysiologiska och morfologiska egenskaper i blad och rötter anpassade för en urban ståndort". Diss. ALnarp: Sveriges Lantbruksuniversitet. 34 s.
- McPherson, G. E., D. J. Nowak & R. A. Rowntree (1994). Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. DOI: 10.2737/NE-GTR-186.
- Miller, D. L., M. Alonzo, D. A. Roberts, C. L. Tague & J. P. McFadden (april 2020). Drought response of urban trees and turfgrass using airborne imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 240, s. 111646. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111646.
- Moore, G. (2009). Urban trees: Worth more than they cost. *Urban Trees: Worth More Than They Cost*, s. 7–14.
- Mullaney, J., T. Lucke & S. J. Trueman (1 febr. 2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning* 134, s. 157–166. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.013.
- Myrup, L., C. McGinn & R. Flocchini (1 juni 1993). An analysis of microclimatic variation in a suburban environment. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* 27.2. Publisher: Elsevier, s. 129–156. DOI: 10.1016/0957-1272(93)90001-M.
- Nowak, D. J., D. E. Crane & J. C. Stevens (3 april 2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4.3, s. 115–123. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007.
- Pauleit, S. & F. Duhme (5 nov. 2000). Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landscape and Urban Planning* 52.1, s. 1–20. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00109-2.
- Quigley, M. F. (1 mars 2004). Street trees and rural conspecifics: Will long-lived trees reach full size in urban conditions? *Urban Ecosystems* 7.1, s. 29–39. DOI: 10.1023/B:UECO.0000020170.58404.e9.
- Ryan, M. (1 mars 2011). Tree responses to drought. *Tree physiology* 31, s. 237–9. DOI: 10.1093/treephys/tpr022.
- Sanders, J., J. Grabosky & P. Cowie (1 mars 2013). Establishing Maximum Size Expectations for Urban Trees with Regard to Designed Space. *Arboriculture and Urban Forestry* 39, s. 68–73. DOI: 10.48044/jauf.2013.010.
- Schenk, H. J. & R. B. Jackson (2002). The Global Biogeography of Roots. *Ecological Monographs* 72.3. _eprint: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1890/0012-9615%282002%29072%5B0311-328%5D>. DOI: 10.1890/0012-9615(2002)072[0311:TGBOR]2.0.CO;2.
- Silvera Seamans, G. (1 jan. 2013). Mainstreaming the environmental benefits of street trees. *Urban Forestry & Urban Greening* 12.1, s. 2–11. DOI: 10.1016/j.ufug.2012.08.004.
- Sjökvisst, E., M. Asp, J. Axén Mårtensson, S. Berggreen-Clausen, G. Berglöv, E. Björck, L. Nylén, A. Ohlsson & H. Persson (2015). *Framtidsklimat i Uppsala län - enligt RCP-scenarier*. SMHI.
- Sjöman, H. & J. Slagstedt (2015). *Träd i urbana landskap*. 1:4. Lund: Studentlitteratur AB. 603 s.
- SMHI (juni 2003). *Faktablad - Torka*. nr 16.
- Susca, T., S. Gaffin & G. Dell'Osso (aug. 2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution* 159.8, s. 2119–2126. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.03.007.
- Sæbø, A., Ž. Borzan, C. Ducatillion, A. Hatzistathis, T. Lagerström, J. Supuka, J. L. García-Valdecantos, F. Rego & J. Van Slycken (2005). "The Selection of Plant Materials for Street Trees, Park Trees and Urban Woodland". *Urban Forests and Trees: A Reference Book*. Utg. av C. Konijnendijk, K.

- Nilsson, T. Randrup & J. Schipperijn. Berlin, Heidelberg: Springer, s. 257–280. DOI: 10.1007/3-540-27684-X_11.
- Thorén, H. (2017). ”Klara din kommun ett stort skyfall?” *Svenskt Vatten*, s. 16.
- Wesström, I. (23 jan. 2022). *Vid vilket vattnehalt bevattnas vanligvis jordbruksgrödor*. E-mail.
- Vico, G., R. Revelli & A. Porporato (2014). Ecohydrology of street trees: design and irrigation requirements for sustainable water use. *Ecohydrology* 7.2. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eco.1369>. s. 508–523. DOI: 10.1002/eco.1369.
- Xiao, Q., E. G. McPherson, J. R. Simpson & S. L. Ustin (1998). Rainfall interception by Sacramento’s urban forest. *Journal of Arboriculture*. 24(4): 235-244. 24.4, s. 235–244.
- Xiao, Q., E. G. McPherson, S. L. Ustin, M. E. Grismer & J. R. Simpson (2000). Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes* 14.4. _eprint: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200003\)14:4<763::AID-HYP971>3.0.CO;2-7](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<763::AID-HYP971>3.0.CO;2-7). s. 763–784. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<763::AID-HYP971>3.0.CO;2-7.

Online

- Ball, J. (6 april 2021). *Trees & Drought Stress*. Trees & drought stress. URL: <https://extension.sdstate.edu/trees-drought-stress> (hämtad 2021-10-21).
- Eivergård, M. (22 okt. 2021). *Nyheter - Institutionen för geovetenskaper - Uppsala universitet*. Publisher: Uppsala universitet. URL: <https://www.geo.uu.se/nyheter/?tarContentId=976284> (hämtad 2022-02-02).
- GreenBlueUrban (2021). *Soil volume calculator*. GreenBlue Urban. URL: <https://greenblue.com/gb/resources/soil-calculator/> (hämtad 2021-11-18).
- NOAA (2021). *Definition of drought*. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/dyk/drought-definition> (hämtad 2021-11-09).
- SMHI (2021a). *Fördjupad klimatscenariotjänst | SMHI*. URL: https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/fordjupade-klimatscenarier/met/uppsala_lan/longdry/rcp85/2071-2100/summer/anom (hämtad 2022-03-16).
- SMHI (24 sept. 2021b). *Historiska torrperioder*. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/torka/historiska-torrperioder-1.151112> (hämtad 2021-09-28).
- SMHI (2021c). *Nederbörd*. URL: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/nederbord> (hämtad 2022-02-02).
- SMHI (2021d). *Sveriges vattenbalans*. URL: <https://www.smhi.se/vader/mark-och-vatten/vattenbalans> (hämtad 2022-02-02).
- SMHI (10 okt. 2019). *Torrperiod*. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/torka-och-torrperiod-1.7085> (hämtad 2021-09-23).
- Svenskt Vatten (16 sept. 2021). *Klimat och dagvatten*. Svenskt Vatten. URL: <https://www.svensktvatten.se/vattentjanster/rornat-och-klimat/klimat-och-dagvatten/> (hämtad 2021-11-10).
- TreesImpactGroup (19 juli 2017). *Estimating soil volume needs of trees in urban situations*. Estimating Soil Volume Needs of Trees in Urban Situations. URL: <https://www.treesimpact.com.au/articles/estimating-soil-volumes-needs-of-trees-in-urban-situations> (hämtad 2021-11-18).

- Uppsala Kommun* (7 nov. 2018). kvarteret sagan. collaborator UppsalaKommun. URL: https://bygg.uppsala.se/planerade-omraden/ulleraker/om-projektet/detaljplaner_ulleraker/kvarteret-sagan-med-flera/ (hämtad 2022-02-02).
- US EPA, O. (2021). *Heat Island Impacts*. URL: <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-impacts> (hämtad 2021-11-08).
- WHO (2021). *Air pollution*. URL: <https://www.who.int/westernpacific/health-topics/air-pollution> (hämtad 2021-10-21).
- Väderstad (2021). *Markvatten och markpackning*. Väderstad. URL: <https://www.vaderstad.com/se/know-how/grunderna-i-agronomi/lat-naturen-gora-jobbet/vatten-i-marken/> (hämtad 2021-11-02).

Unpublished

- Wesström, I. (23 jan. 2022). *Vid vilket vattnehalt bevaknas vanligtvis jordbruksgrödor*. E-mail.

8 Appendix

8.1 Uppsala klimat

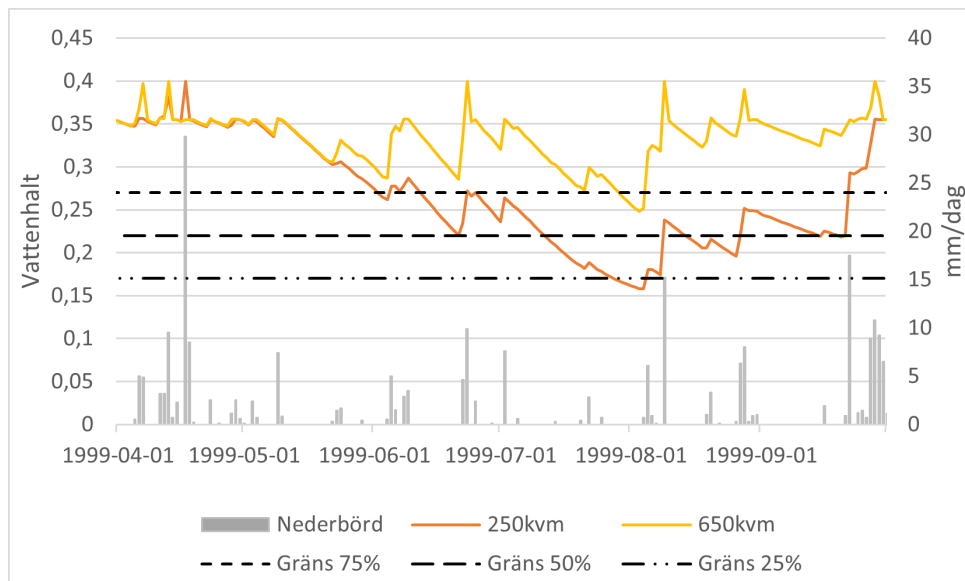
Tabell 12: Månadsnederbörd [mm/månad] för vegetationsperiodens månader under perioden 1991-2020 samt summerad nederbörd [mm] för hela perioden. Längst ned i tabellen ges medelvärde för varje månad och för hela perioden. Nederbördsdata sammanställd från (SMHI 2021c).

År	april	maj	juni	juli	augusti	september	Summa
1991	24,4	61,5	93,7	45,6	118,2	62,6	406
1992	80,9	22,8	24,7	111,4	67,6	42,1	349,5
1993	28,2	23,6	67,7	37,4	90,6	13,8	261,3
1994	28,5	31,8	47,6	6,3	71,5	106,4	292,1
1995	94,3	35,8	46,3	37,7	16,9	99,9	330,9
1996	14	59,2	70	73,1	27,6	31,9	275,8
1997	18,4	54,2	117,5	45,5	132,9	58,3	426,8
1998	33,1	42,6	86,6	85,4	69	43,3	360
1999	74,6	15,2	30,4	12,4	44,2	59	235,8
2000	19,9	40,4	44,2	118,3	23,4	6,4	252,6
2001	30	26,5	18,7	61,8	124,1	53,5	314,6
2002	6,8	36,7	104,2	90,8	4,2	41,1	283,8
2003	43,1	65,2	74,8	20,3	57,5	32,3	293,2
2004	18,3	44,2	78,6	66,4	39,4	53,3	300,2
2005	9,9	56,4	81,9	100,9	89,3	12,9	351,3
2006	32,8	49,6	45,8	25,8	83,2	38,6	275,8
2007	41,6	52,3	33	39,7	45,2	73	284,8
2008	40,9	15	73,6	33,5	146,9	11,7	321,6
2009	3,2	43,6	117,1	86,3	82,3	32,5	365
2010	29	46,9	34,7	64,2	110	48,4	333,2
2011	8,5	15,2	51,4	15,1	140,4	77,2	307,8
2012	57,2	50,9	115,2	38,4	114	77,8	453,5
2013	40,9	12,7	63	17,1	37,8	49,2	220,7
2014	45,9	57,5	64,7	41,6	121,7	50,2	381,6
2015	13,6	82,8	43,9	112,9	9,4	72,5	335,1
2016	37,3	22	41,4	74,7	78,8	11	265,2
2017	26,5	14	49,2	19,7	76,3	75,9	261,6
2018	33,6	6,8	26,5	89,1	105,1	44,6	305,7
2019	1,6	56,1	35,3	62,5	61,8	43,9	261,2
2020	15,9	38,6	54,6	88,9	19,3	35,9	253,2
Medelvärde	31,8	39,3	61,2	57,4	73,6	48,6	312

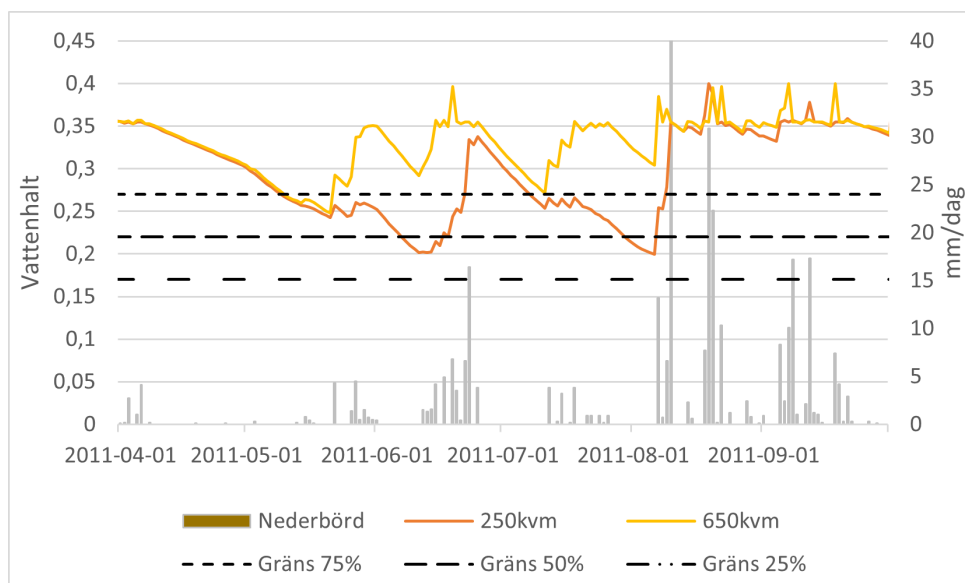
Tabell 13: Månadsnederbörd [mm/månad] för sommarmånaderna under perioden 1991-2020 samt summerad nederbörd [mm] för hela perioden. Längst ned i tabellen ges medelvärde för varje månad och för hela perioden. Nederbördsdata sammanställda från (SMHI 2021c).

År	juni	juli	augusti	Summa
1991	93,7	45,6	118,2	257,5
1992	24,7	111,4	67,6	203,7
1993	67,7	37,4	90,6	195,7
1994	47,6	6,3	71,5	125,4
1995	46,3	37,7	16,9	100,9
1996	70	73,1	27,6	170,7
1997	117,5	45,5	132,9	295,9
1998	86,6	85,4	69	241
1999	30,4	12,4	44,2	87
2000	44,2	118,3	23,4	185,9
2001	18,7	61,8	124,1	204,6
2002	104,2	90,8	4,2	199,2
2003	74,8	20,3	57,5	152,6
2004	78,6	66,4	39,4	184,4
2005	81,9	100,9	89,3	272,1
2006	45,8	25,8	83,2	154,8
2007	33	39,7	45,2	117,9
2008	73,6	33,5	146,9	254
2009	117,1	86,3	82,3	285,7
2010	34,7	64,2	110	208,9
2011	51,4	15,1	140,4	206,9
2012	115,2	38,4	114	267,6
2013	63	17,1	37,8	117,9
2014	64,7	41,6	121,7	228
2015	43,9	112,9	9,4	166,2
2016	41,4	74,7	78,8	194,9
2017	49,2	19,7	76,3	145,2
2018	26,5	89,1	105,1	220
2019	35,3	62,5	61,8	159,6
2020	54,6	88,9	19,3	162,8
Medelvärde	61,21	57,4	73,6	192,3

8.2 Tillrinningsområden

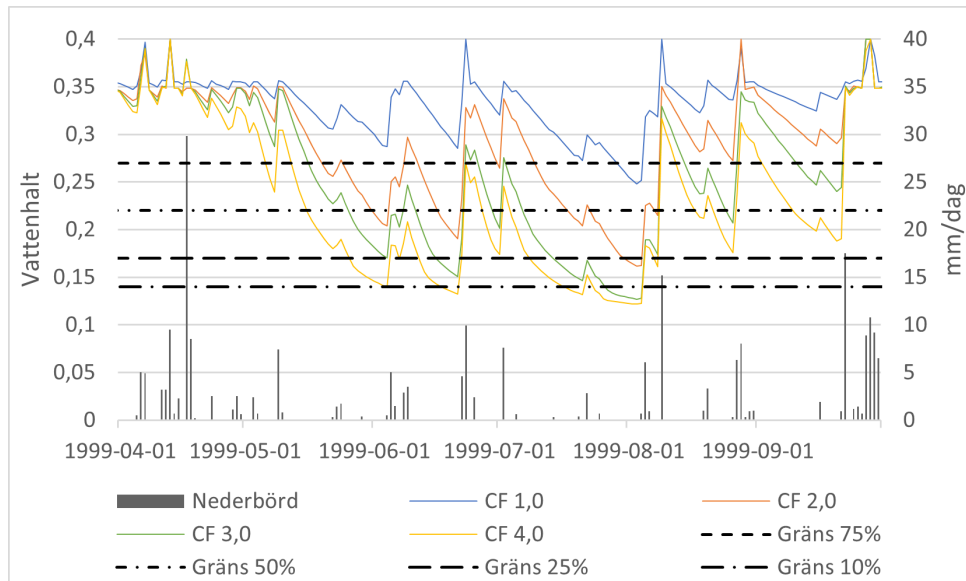


Figur 24: Skillnader i vattenhalten under vegetationsperioden år 1999 för tillrinningsområden som är 250 och 650 kvadratmeter stora.

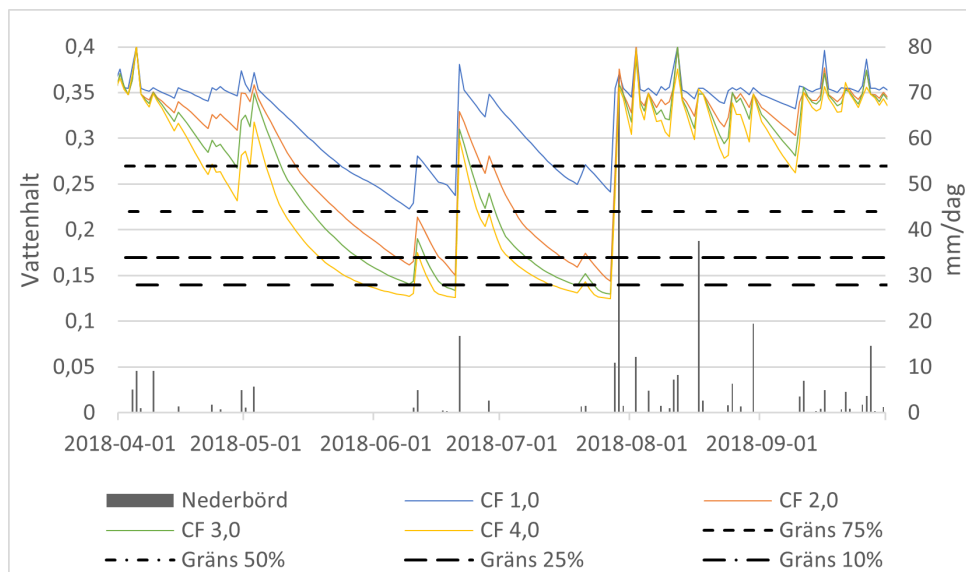


Figur 25: Skillnader i vattenhalten under vegetationsperioden år 2011 för tillrinningsområden som är 250 och 650 kvadratmeter stora.

8.3 Crop factor



Figur 26: Skillnader i vattenhalten under vegetationsperioden år 2011 för varierande crop factor med ett 650 m² stort tillrinningsområdet.



Figur 27: Skillnader i vattenhalten under vegetationsperioden år 2011 för varierande crop factor med ett 650 m² stort tillrinningsområdet.