

Hur medveten grönytedesign och infiltrationskapacitet kan påverka stadens översvämningsrisker

How conscious green area design and soil infiltration capacity can affect flooding risks in urban areas



Johan Kjellin¹, Sara Ekeröth², Daniel Erdal³, Jimmy Olsson⁴, Elin Andersson⁵, Xavier Mir Rigau⁵, Julia Granlund², Ico Broekhuizen⁶

¹ Tyréns AB, Sturegatan 4, 784 31 Borlänge, johan.kjellin@tyrens.se

² Tyréns AB, Kungsängsgatan 5A, 753 22 Uppsala

³ Tyréns AB, Lilla Badhusgatan 2, 411 21 Göteborg

⁴ Tyréns AB, Prästgatan 51, 831 34 Östersund

⁵ Tyréns AB, Folkungagatan 44, 118 86 Stockholm

⁶ Luleå Tekniska Universitet, 97187 Luleå

Abstract

Flood risks in urban areas is an increasingly important topic due to ongoing climate change and rising costs from intense rainfall damage. While it is well-established that green areas can help mitigate floods there remains a gap in understanding critical parameters influencing the effectiveness of green areas in flood mitigation. This article sheds light on the variability in infiltration capacity across different park soils and its implications for flood risks in a city. It explores how infiltration capacity is influenced by initial soil moisture conditions and soil compaction. The findings show substantial variations in surface runoff within urban green areas based on soil type, initial soil moisture conditions, and the degree of compaction as well as for different rainfall intensities. Urban soils with 80% or more sand can for example, compared to soils with 60% sand, reduce surface runoff by a factor three. Furthermore, activities causing compaction in green areas can double the surface runoff. The study therefore emphasizes a conscious approach to the design and manage urban green areas

prioritizing a high sand content in park soils while minimizing soil compaction. Stormwater investigations should account for variations in soil type as well as for various rainfall scenarios. By adopting these measures cities can enhance their resilience to flood risks.

Key words: urban flooding, infiltration capacity, surface runoff, soil moisture, soil compaction

Sammanfattning

Översvämningsrisker blir allt mer centrala att hantera i våra städer i takt med klimatförändringar och ökade skadekostnader från skyfall. Det är välkänt att grönytor kan nyttjas för att mildra översvämningar genom infiltration och fördröjning av nederbörd. Däremot finns det kunskapsluckor i förståelsen av kritiska parametrar som påverkar grönytors översvämningsdämpande effekt. Genom denna artikel ges en inblick i hur infiltrationskapaciteten varierar mellan olika jordar i grönområden samt vad detta betyder för översvämningsriskerna i en stad. Vidare belyses hur infiltrationskapaciteten påverkas av initiala markmättnadsförhållanden samt av grönytans packningsgrad. Studiens resultat visar på betydande variationer i ytavrinning från grönområden utifrån jordtyp, initiala markmättnadsförhållanden, kompakteringsgrad och regnintensitet. Exempelvis kan parkjordar med 80% eller sand i övre jordlagren reducera ytavrinning med i storleksordningen en faktor tre jämfört med jordar med 60% sand. Vidare visar studien att aktiviteter som kompakterar grönytor i vissa fall kan orsaka en fördubbling av ytavrinning. Utifrån studiens resultat rekommenderas en medveten design och drift av parkmiljöer där högt sandinnehåll prioriteras samt att markpackning minimeras. Utöver detta rekommenderas att dagvatten- och skyfallsutredningar i större utsträckning än idag tar hänsyn till hur avrinning påverkas av variation mellan olika jordtyper och regnförlopp. Genom dessa åtgärder kan våra städers resiliens ökas gällande översvämningar och klimatförändringar.

Bakgrund och syfte

Översvämningsriskerna blir allt mer centrala att hantera i våra städer i takt med klimatförändringar och ökande skadekostnader från skyfall. Exempelvis har egendoms-skadorna för översvämningarna i Dalarna och Gävleborg sommaren 2021 uppskattats till minst 1,6 miljarder kronor (Svensk Försäkring, 2022). Sedan länge är det känt att grönytor kan nyttjas för att infiltrera och fördröja vatten, och på så sätt mildra översvämningars omfattning. Vad gäller ytvattenmagasin i grönytor har vi i branschen en relativt god uppfattning om rimlig beräkningsmetodik, men när det kommer till infiltration i grönytor råder betydligt större osäkerhet och beräkningsmetod samt parametervärden kan skilja sig åt väsentligt mellan olika avrinningsutredningar. Svenskt vatten beskriver för Rationella metoden i P110 avrinningskoefficienter till park- samt naturmarksområden samt att avrinningskoefficienterna är kopplade till markförhållanden och regnens återkomsttid. Det saknas dock närmare beskrivning av koppling till jordarter, markmättnad och markpackning. I tvådimensionella markavrinningsmodeller finns olika typer

av infiltrationsmoduler såsom kurvnummermetoden samt boxrepresentationer med parametrering av porvolym samt mättade och omättade infiltrationshastigheter. Oavsett beräkningsmetod finns dock behov av mer kunskap kring avrinning från olika parkjordar och hur dessa påverkar översvämningsrisker. Kunskapsbristen består dels i brist på data över infiltrationskapaciteten för olika urbana jordtyper och markmättnader, dels i bristande kännedom om vilka jordar vi faktiskt har i städernas grönområden.

Genom denna artikel vill vi ge en inblick i hur infiltrationskapaciteten kan variera mellan olika jordar i urbana grönytor, hur den påverkas av initial markmättnad när det börjar regna, samt vad detta kan betyda för översvämningsriskerna i en stad. Utöver jordtypens inverkan visar vi även hur markpackningsgraden kan påverka ytavrinning vid kraftiga skyfall. Såväl jordart som markpackning är möjliga att anpassa vid anläggning av, och arbete med, grönytor, varför vi faktiskt har möjlighet att påverka översvämningsrisker när vi designar parkmiljöer.

Studien bygger på modelleringsstudier av infiltration

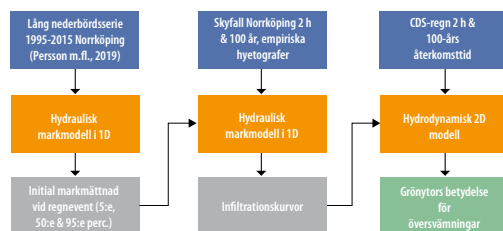
och ytavrinning för olika grönytejordar, initial markmättnad och markpackningsgrader, samt på fältmätningar av markegenskaper och infiltrationskapacitet i svenska parkmiljöer. I denna artikel visas ett axplock av jordar, och fokus ligger på vad jordegenskaper och markhantering kan innebära för översvämningsriskerna i en stad. Ett betydligt större underlag, med ca 300 jordar och jordlagerkombinationer, har dock tagits fram vilket planeras att publiceras i en kommande vetenskaplig artikel.

Denna studie genomfördes inom det Vinnovafinansierade projektet SECURE (dnr. 2021-02458) i ett samarbete mellan Tyréns AB, StormTac AB och Luleå Tekniska Universitet. Som referensgrupp för styrande av projektets inriktning har SVOA, Trafikverket samt Svenskt Vatten deltagit och bidragit med värdefulla insikter. Vidare har tre examensarbeten i samarbete mellan Tyréns AB och Uppsala Universitet utförts inom ramen för projektet vilka bidragit med modellering och fältdata (Barkefors, 2023; Nilsson, 2023; Novikova, 2023).

Metodik

Jordartens och markmättnadens betydelse

För att undersöka urbana grönytors betydelse för översvämningsrisker har modellering gjorts med såväl en hydraulisk markmodell i 1D som en hydrodynamisk 2D modell. En lång historisk regnserie på 20 år har nyttjats för att ta fram statistik över initiala markmättnaden inför regn. Korta intensiva regn har sedan använts tillsammans med den framtagna initiala markmättnadsstatistiken för att ta fram infiltrationskurvor för olika skyfallscenarier. Infiltrationskurvorna har därefter implementerats i den hydrodynamiska 2D-modellen för att beräkna flöden och översvämningsförlopp på stadsdelsnivå i två fallstudier. I Figur 1 visas ett förenklat schematiskt flöde för modelleringen-



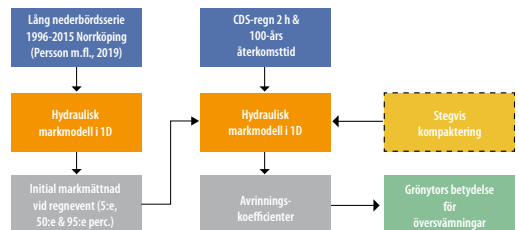
Figur 1. Schematiskt flöde för modelleringen där utdata från 1D-modellen nyttjats i 2D-modellen.

processen där utdata från 1D-modellen har nyttjats i 2D-modellen.

Markpackningens betydelse

Utöver jordart och markmättnad påverkas avrinningen från grönytor även av jordens kompakteringsgrad. Såväl porvolym och struktur som konnektivitet påverkas vid markpackning vilket kan minska infiltrationskapaciteten. Vid anläggning och drift av urbana grönytor kan kompakteringsgraden öka vilket i sin tur då kan ge effekter på infiltrationen.

För att kvantifiera hur markpackningsgraden i kombination med olika parkjordar och initiala markmättnader påverkar infiltrationskapaciteten gjordes även här simuleringar med en hydraulisk markmodell i 1D. Effekten på infiltration och ytavrinning utvärderades genom avrinningskoefficienter (kumulativ ytavrinning/kumulativ nederbörd). I Figur 2 presenteras ett schematiskt flöde för studieupplägget och modellering-



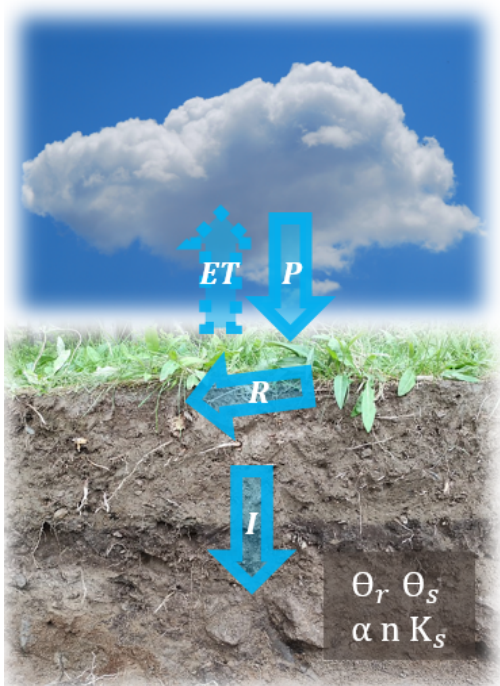
Figur 2. Schematiskt flöde för modellering av markpackningens påverkan på ytavrinningen.

ngsprocessen. Även här nyttjades statistik över initial markmättnad från de inledande simuleringarna av den 20-åriga regnserien.

Modellering av initial markmättnad och infiltration

För denna studie har modelleringsverktyget HYDRUS-1D använts till att modellera infiltrationen i en markprofil. HYDRUS-1D är en hydraulisk markmodell som kan simulera flödestransport av mättade och omättade flöden i ett poröst media (Šimůnek m. fl., 2009). Huvudsyftet med simuleringarna var att kvantifiera hur stor andel av nederbörden som faller på en urban grönyta som infiltrerar, evapotranspirerar respektive ytavrinner.

I studien användes en markprofil med ett djup på 2,5 m som antas vara bevuxen med gräs och med en

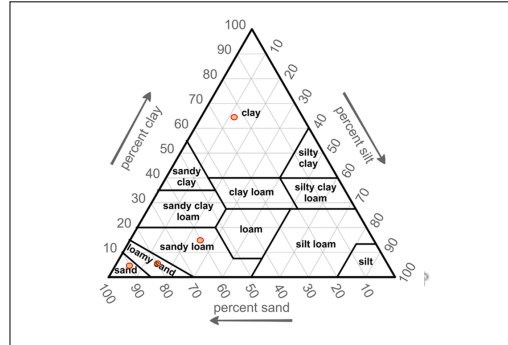


Figur 3. Konceptuell bild av transportprocesser som HYDRUS-1D beskriver och vilka parametrar som nyttjas. ET: evapotranspiration, P: nederbörd, R: ytavrinning, I: infiltration, samt hydrauliska markparametrar: Θ_r : residuala vatteninnehållet, Θ_s : mättat vatteninnehåll, K_s : mättad hydraulisk konduktivitet, α och n är kurvparametrar.

svag lutning i markplanet. Lutningen gör att det vatten som inte infiltrerar eller evapotranspirerar ytavrinner direkt utan att bilda stående vatten, således skapas inget tryck ovan mark som kan påverka infiltrationskapaciteten. I Figur 3 visas konceptuellt vilka parametrar och transportprocesser som den hydrauliska markmodellen beskriver och nyttjar.

Infiltrationskapaciteten är i hög grad beroende av markparametrar så som jordartssammansättning, porositet och mättnadsgrad (Nielsen, 2019; Davidsen m. fl., 2018; Pitt m.fl., 2008). För att ge en bred förståelse för olika jordarters infiltrationssegenskaper skapades en ensemble av flera olika jordar utifrån USDA:s jordartstriangel (Groenendyk m.fl., 2015), se Figur 4 nedan där jordarna som använts i denna studie finns markerade och presenteras nedan. Detta för att få en bred spridning och representation av olika fall inom, såväl som mellan, olika jordarter.

Denna artikel fokuserar på fyra olika jordar: lera (clay), lerig sand (sandy loam), siltig sand (loamy sand)



Figur 4. USDA:s jordartstriangel som användes för att skapa en ensemble av olika jordar och ungefärlig placering av de jordar som används i denna studie (Groenendyk m.fl., 2015).

och sand (sand). Den svenska översättningen utgår ifrån deras jordartssammansättning, se Tabell 1 (Larsson, 2008 & SGF/BGS, 2001). För att parametrera jordarna användes jordartssammansättningen (andel av lera, silt respektive sand) samt skrymdensitet, se Tabell 1. Skrymdensitet är ett mått på jordens densitet vilken tar hänsyn till materialets totala volym inklusive porvolymen.

I AMA Anläggning 20 finns krav för val av jord vid anläggning av vegetationsytor (AMA, 2020). Enligt denna finns två godkända växtjordar vid anläggning med krav på kornstorleksfördelning för växt- och mineraljord för normala (AMA DCL.11/1 Jord A) respektive torra (AMA DCL.11/1 Jord B) växtförhållanden. De tre jordarna lerig sand, siltig sand och sand i denna rapport har bland annat valts då de är i linje med

Tabell 1. I tabellen sammanställs jordartssammansättning (% av lera, silt och sand) samt skrymdensiteten för de fyra jordarna som använts

Jordtyp	Skrymdensitet	Jordartssammansättning		
		Lera	Silt	Sand
Lera	1,39 g/cm ³	64 %	12 %	24 %
Lerig sand (AMA Jord A)	1,37 g/cm ³	15 %	25 %	60 %
Siltig sand (AMA Jord A/B)	1,30 g/cm ³	5 %	15 %	80 %
Sand (AMA Jord B)	1,49 g/cm ³	2 %	4 %	94 %

AMAs krav vilket gör att de sannolikt förekommer i urbana parkmiljöer. Leran valdes som fjärde jord för att representera mer extrema fall med tätare jordar. AMAs krav på växtjordar sammanställs i Tabell 2 med kornstorleksgränserna mellan ler och silt (<0,002 mm), mellan silt och sand (<0,063 mm) samt övre gräns för sand (<2,0 mm). Lerig sand kan enligt dessa gränser

Tabell 2. Krav på kornstorleksfördelning för normala respektive torra utföranden vid val av växtjord för AMA DCL.11/1 Jord A och Jord B.

Sikt, mm	< 0,002	< 0,063	< 2,0
AMA DCL.11/1 Jord A (normala utföranden)			
Max %	15	40	100
Min %	5	15	60
AMA DCL.11/1 Jord B (torra utföranden)			
Max %	5	20	-
Min %	-	0	80

klassificeras som en AMA DCL.11/1 Jord A. Siltig sand är på gränsen mellan de två och kan klassas både som en AMA DCL.11/1 Jord A och Jord B. Sanden som användes i studien kan klassas som en Jord B (AMA, 2020). Liknande jordar som dessa kan därför förväntas vara vanligt förekommande i svenska parkmiljöer.

För att ta fram hydrauliska jordparametrar till HYDRUS-1D användes ROSETTA-modellen (Schaap m.fl., 2001). ROSETTA-modellen använder sig av pedotransferfunktioner (PTF) för att uppskatta parametrarna till Van Genuchten's (1980) funktion för vattenretention och relativ permeabilitet. Med hjälp av parametrarna Θ_r (residuala vatteninnehållet), Θ_s (mättat vatteninnehåll), K_s (mättad hydraulisk konduktivitet), α och n (kurvparametrar) uppskattas jordens vattenhållande förmåga och omättade hydrauliska konduktivitet.

Simulering av initial markmättnad utifrån historisk regnserie

För att simulera initial markmättnad i jordprofilerna användes en meteorologisk serie på 20 år (1996-2015) med en upplösning på 30 minuter från Norrköping, med data över nederbörd och potentiell avdunstning (Persson m. fl., 2019) som indata till den hydrauliska markmodellen. I serien separerades regnevent utifrån kriterierna: föregående regnuppehåll i minst tre timmar, regnvolym minst två mm och varaktighet minst två timmar (Hernebring, 2006). I HYDRUS-1D genereras ytavrinning när regnintensiteten överstiger den hydrauliska konduktiviteten. Ytavrinningens frekvens påverkas därför av regnets tidsupplösning, där en kortare tidsupplösning kan leda till en ökad ytavrinning. Då fokus för den långa regnserien ligger på

utvärdering av markmättnad snarare än kvantifiering av ytavrinning är dock regnets diskretisering av mindre betydelse i denna del av studien, varför 30 minuters upplösning bedöms relevant. Vidare är studiens fokus ytavrinning till följd av extrema regn, varför enbart perioden mars till september studerades för att undvika processer relaterade till snöfall eller snösmältning.

För alla regnevent samlades sedan de initiala markmättnaderna över djupet för tidssteget precis innan regneventets början till en ensemble av initiala markmättnader. En sådan ensemble har tagits fram för varje jordart. Från dessa ensembler valdes tre percentiler ut, 5:e, 50:e och 95:e, vilka förenklat kan förklaras representera väldigt torra, normala respektive väldigt blöta markförhållanden. Det ska noteras att vid riktigt torra förhållanden kan infiltrationskapaciteten i jordar gå ner dramatiskt. Dessa extremer simuleras dock inte i detta projekt, då de kräver andra modeller och/eller parametreringar, varför alltså 5-percentilen motsvarar ett torrt men inte helt uttorkat läge.

Simulering av skyfall i hydraulisk markmodell i 1D

För att analysera jordartens och den initiala markmättnadens påverkan på ytavrinning vid skyfall simulerades korta intensiva regn med samma markmodell som använts vid simulering av den långa regnserien. En parameteruppsättning för respektive jordart sattes upp och sedan simulerades 100-årsregn med de tre olika graderna (percentilerna) av initial markmättnad som tagits fram genom simulering av den långa regnserien. Varje modelluppsättning belastades med fem olika fördelningar av regnintensiteter (hyetografer), alla med samma totala nederbörds mängd motsvarande en återkomsttid på 100 år för Norrköpingsområdet. Hyetograferna är framtagna av Olsson m.fl. (2017) och bygger på svensk skyfallstatistik. Varaktigheten hos de simulerade regnen var två timmar med en totalt nederbörds mängd på 47,4 mm (SMHI, u.d.). För simulering av skyfall där fokus var att utreda ytavrinning vid korta mer intensiva förlopp användes en högre upplösning om 72 sekunder på regnet.

Davidson m. fl. (2018) visar i sin studie att det inte finns någon koppling mellan initial markmättnad och regnets återkomsttid. Markmättnadsstatistiken från

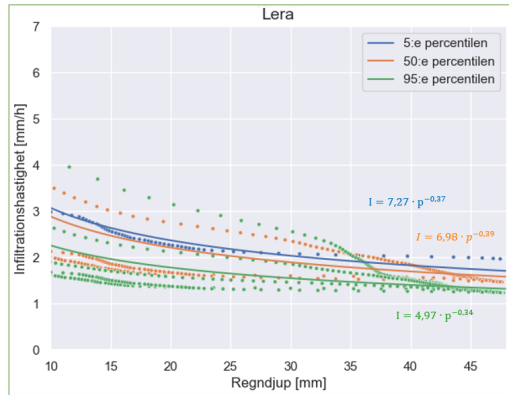
den historiska regnserien användes därför som initial villkor för samtliga intensivregn oavsett återkomsttid. Resultatet från skyfallssimuleringarna med en temporal upplösning av infiltration- och ytavrinningsförloppen användes sedan för att producera ett antal infiltrationskurvor som redovisar infiltrationshastigheten i respektive jord satt i relation till kumulativ nederbörd.

Framtagande av infiltrationskurvor

Det är en utmaning att adekvat beskriva markens infiltrationskapacitet under ett regnförlopp med en hydrodynamisk 2D markavrinningsmodell. Infiltration påverkas av många faktorer såsom regnets intensitet och varaktighet, jordegenskaper, markmättnad, avrinningsområdets topografi och markanvändning. Då ett av syftena med denna studie var att studera hur konsekvenserna från ett skyfall påverkas av jordart och initial markmättnad var det viktigt att parametrisera markförhållandena så korrekt som möjligt. Därför har ett nytt tillvägagångssätt tagits fram för att kunna implementera infiltrationsresultaten från den hydrauliska markmodelleringen till en hydrodynamisk 2D markavrinningsmodell.

Resultaten gällande infiltration och ytavrinning från simulering av skyfall i 1D modellen användes för att ta fram samband mellan ackumulerad nederbörd och infiltrationshastighet i form av jordarts- och markmättnad-specifika infiltrationskurvor. Infiltrationskurvorna användes sedan som indata i 2D markavrinningsmodellen för att beskriva infiltrationshastigheten under regnförloppet. En mer renodlad hydraulisk markmodell likt HYDRUS-1D beskriver markfysikaliska processer i en jordprofil betydligt mer detaljerat än vad som vanligtvis är fallet i de infiltrationsmoduler som finns tillgängliga i 2D markavrinningsmodeller. Med denna approach finns möjlighet att nyttja HYDRUS-1D modellens resultat i 2D-markavrinningsmodellen.

Dynamiken i infiltrationsprocessen under de simulerade 100-årsregnen i HYDRUS-1D kvantifierades genom att anpassa en potensekvation som beskriver infiltrationskapacitet som funktion av ackumulerad nederbörd för respektive jord och initial markmättnad (se Figur 5 och Figur 6). Kurvanpassningen gjordes endast med data då modellen påvisade ytavrinning för att säkerställa att ekvationen beskriver den maximala infiltrationskapaciteten. För sandjorden, som är mycket

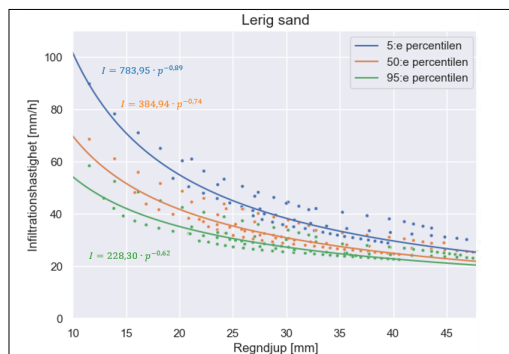


Figur 5. Infiltrationskurvor och tillhörande data från 1D simuleringar för lera och de tre markmättnadspercentilerna (5:e, 50:e och 95:e).

genomsläpplig, uppstod ingen ytavrinning oavsett initial markmättnad och således gjordes ingen kurvanpassning för den jordtypen. Istället ansattes en konstant infiltrationshastighet på 97,5 mm/h för sanden (uppskattad med ROSETTA (Schaap m.fl., 2001)). För övriga jordtyper, lera och lerig sand, anpassades en ekvation för varje fall av initial markmättnad. Inför kurvanpassningen viktades datapunkterna från simuleringarna utifrån hur vanligt förekommande respektive hyetograf är enligt Olsson m. fl. (2017). Utifrån de framtagna infiltrationskurvorna skapades tidsserier med infiltrationshastighet för det typregn som användes i den hydrodynamiska 2D modellen.

Fallstudier Fagersjö och Fårsta-Larsboda

För att belysa hur initial markmättnad och jordart kan påverka översvämningar på stadsnivå genomfördes två fallstudier med skyfallsmodellering i 2D.



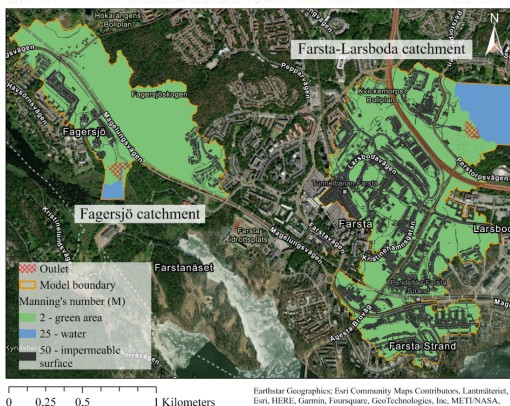
Figur 6. Infiltrationskurvor och tillhörande data från 1D simuleringar för lerig sand och de tre markmättnadspercentilerna (5:e, 50:e och 95:e).

Modelleringsmetodik och scenarier

Skyfallsmodelleringen på stadsnivå utfördes med den hydrodynamiska 2D-modellen där den markmättnads- och infiltrationsdata som tagits fram med hjälp av den hydrauliska markmodellen i 1D nyttjades. 2D-modelleringen gjordes i programvaran MIKE+ med modulen 2D Overland (DHI, 2023) där modeller sattes upp för Fagersjö samt för Farsta-Larsboda, båda söder om centrala Stockholm. De två modellområdena visas i Figur 7.

Modellen med en upplösning på 2x2 meter (Lantmäteriet, Markhöjdmodell grid 1+) simulerades med ett CDS-regn med återkomsttid på 100 år, varaktighet två timmar och total nederbörds mängd på 65,3 mm samt en upplösning på 5 minuter. Ett CDS-regn (Chicago design storm) är ett symmetriskt typregn som byggs upp av flera olika blockregn med varierande varaktighet och intensitet. Fördelen med att använda CDS-regn är att den totala simuleringstiden begränsas samtidigt som resultaten rymmer den värsta situationen (Svenskt Vatten, 2011). Inget avdrag för ledningsnät gjordes med antagandet att 100-årsregnet kraftigt överstiger kapaciteten för ledningsnätet.

Markanvändningen delades in i hårdgjorda ytor, vattenytor och grönytor. Med hänsyn till enbart hårdgjorda ytor och grönytor (exklusive vattenytor) utgjordes 84.4 % av grönytor i Fagersjö respektive 57.3 % i Farsta-Larsboda. För grönytorna studerades jordarterna som beskrivits i föregående avsnitt nämligen lera, lerig sand och sand. För varje simulering antogs alla gröna ytor i modellområdet utgöras av samma jordart.



Figur 7. Modellområdena Fagersjö och Farsta-Larsboda (Barkefors, 2023).

Detta för att mer entydigt utvärdera påverkan från de olika jordarterna och från initial markmättnad. Fagersjöns grönytor består dock egentligen av både stora skogsområden och mer urbana anlagda gröna ytor, med sannolikt en mix av olika jordarter.

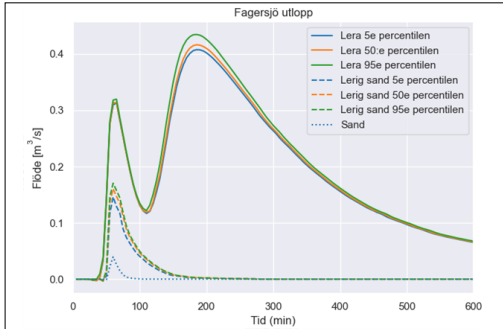
Infiltrationsdynamiken i grönytorna modellerades utifrån de framtagna markmättnads- och jordartsspecifika infiltrationskurvorna. Nyttjandet av infiltrationskurvorna möjliggjorde att det, med ökad markmättnad, avtagande infiltrationsförloppet kunde fångas i 2D-modellen. På så vis undersöktes hur infiltrationsdynamiken påverkar ytavrinningen i en hydrodynamisk modell. För sandjorden ansattes, som ovan beskrivet, en konstant infiltrationshastighet. Hårdgjorda ytor (inklusive vattenytor) ansattes med en infiltrationshastighet om 0 mm/h.

Då infiltrationen är beroende av initial markmättnad simulerades de tre markmättnadsfallen (5:e, 50:e och 95:e percentilen) med olika infiltrationskurvor för de två jordarna lera och lerig sand. Sand simulerades enbart en gång då denna inte påverkades av initial markmättnad. Sammanlagt kördes således sju simuleringar för respektive modellområde.

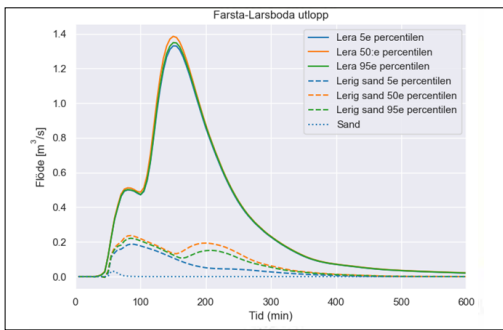
Resultat Fallstudier Fagersjö och Farsta-Larsboda

Avrinning för de olika jordarts- och markmättnadsfallen utvärderades genom 2D-modellen och resultaten redovisas här i form av hydrografer av flödena ut från avrinningsområdena, sammantagna avrinningskoefficienter för hela avrinningsområdena och exempel på översvämningsutbredning vid specifika riskutsatta platser. Vidare presenteras statistik över översvämmad area för de olika fallen då översvämningsdjupet överstiger 15 cm respektive 50 cm.

Hydrografer vid utloppen från Fagersjö och Farsta-Larsboda visas i Figur 8 respektive Figur 9 (se markering av utloppen i Figur 7 ovan). Låga negativa flöden förekommer stundtals då flödet under simuleringen byter riktning vid tvärsnittet. Båda områdena visar tydliga skillnader i kumulativ avrinningen volym såväl som vad gäller maxflöde mellan olika jordarter. Sand generar i princip ingen avrinning alls för något område vilket är i linje med simuleringarna av sand i den hydrauliska markmodellen. Därtill kan även vatten från hårdgjorda ytor infiltrera i sandjorden.



Figur 8. Flöde i m³/s flöde vid utlopp i Fagersjö för simulering av de första 600 minuterna (total simuleringstid 24 h (1440 min)).



Figur 9. Flöde i m³/s flöde vid utlopp i Farsta-Larsboda för simulering av de första 600 minuterna (total simuleringstid 24 h (1440min)).

Den initiala markmättnaden har i båda fallstudierna marginell påverkan på avrinningen om grönyrtorna utgörs av lera. En anledning till detta kan vara att leran är väldigt tät och att infiltrationskapaciteten är så pass begränsad att en ökad markmättnad inte ger någon större effekt. För lerig sand (AMA jord A) ses dock en tydligare ökning av avrinningen vid högre initial markmättnad, framför allt i Farsta-Larsboda. Dubbla flödestoppar kan ses i hydrograferna för leran i båda modellområdena, samt även för AMA-jord A i Farsta-Larsboda, vilket beror på större lågpunkter i områdena som först fylls upp och därefter bräddar över.

I Tabell 3 redovisas kumulativ avrunnen volym i utloppspunkterna från avrinningsområdet samt genomsnittliga avrinningskoefficienten för hela området. Den genomsnittliga avrinningskoefficienten (andel av total nederbörd som bildar ytavrinning) är inte bara ett mått på hur mycket vatten som infiltrerat i området utan beror även på hur mycket vatten som stannar kvar i lågpunkter inom avrinningsområdena vid simulering-

Tabell 3. Sammanställning av area, nederbördsvolym samt utflöde och beräknad avrinningskoefficient sett till hela modellområdena i Fagersjö respektive Farsta-Larsboda för de tre jordarterna och tillhörande initial markmättnadspercentil (total simuleringstid för modellområdena var 24 h).

Modellområde	Fagersjö		Farsta-Larsboda		
Area	0,825 km ²		1,64 km ²		
Nederbördsvolym	53 844 m ³		107 034 m ³		
Jordart	Percentil	Utflöde [m ³]	Avrinningskoefficient [-]	Utflöde [m ³]	Avrinningskoefficient [-]
Lera	5	7670	0,1424	11 783	0,1101
	50	7807	0,1450	11 942	0,1116
	95	8085	0,1502	12 215	0,1141
Lerig sand	5	330	0,0061	1 472	0,0138
	50	387	0,0072	2 267	0,0212
	95	414	0,0077	2 638	0,0246
Sand	-	35	0,0007	30	0,0003

ens slut. Därför är avrinningskoefficienten från 2D modelleringen inte direkt jämförbar med avrinningskoefficienten från 1D modelleringen. Avrinningskoefficienter som används i Rationella metoden tar hänsyn till initiala förluster så som infiltration, avdunstning och absorption samt ojämnheter i markytan (Svenskt vatten, 2019). Däremot kan inte metoden ta hänsyn till lagring av vatten inom planområdet i exempelvis större lågpunkter. Flera studier visar därför, likt denna studie, att en sammantagen avrinningskoefficient för ett större avrinningsområde med varierande topografi erhåller betydligt lägre koefficienter än standardiserade avrinningskoefficienter som rekommenderas att användas i metoder likt Rationella metoden (Cleveland m.fl., 2011). Liksom i hydrograferna syns även här en mycket stor skillnad mellan jordarterna i avrinning, men även stora skillnader i avrunnen volym mellan de olika fallen av initial markmättnad för AMA-jorden.

Skillnaderna i total översvämningsutbredning mellan olika jordarter och initial markmättnad redovisas även i form av översvämmad area med vattendjup på över 15 cm (lägre nivåer än så ger sällan omfattande översvämningskador) respektive 50 cm, se Tabell 4. I Fagersjöområdet fördubblas andel översvämmad area om jordarten ändras från sand till lerig sand och något mer än en fördubbling om sand byts ut mot lera. För Farsta-Larsboda är skillnaderna något mindre, vilket sannolikt främst beror på att Farsta-Larsboda har högre andel hårdgjorda ytor än Fagersjö. När det gäller påverkan från initial markmättnad ses likt för hydrograferna

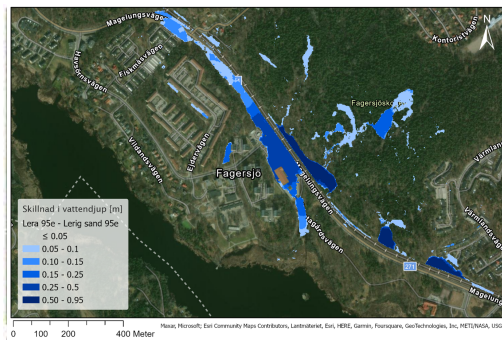
Tabell 4. Sammanställning av översvämmad area (som procent av total area) för vattendjup som överstiger 15 cm respektive 50 cm för båda fallstudierna och samtliga jordar med tillhörande initial markmättnad.

Jordart	Percentil	Fagersjö		Farsta-Larsboda	
		>15 cm	>50 cm	>15 cm	>50 cm
Lera	5	15,5 %	6,4 %	19,8 %	11,5 %
	50	15,5 %	6,4 %	19,9 %	11,5 %
	95	15,6 %	6,5 %	19,9 %	11,6 %
Lerig sand	5	11,2 %	4,3 %	16,8 %	9,7 %
	50	11,8 %	4,5 %	17,2 %	9,9 %
	95	12,1 %	4,6 %	17,3 %	9,9 %
Sand	-	6,2 %	2,7 %	9,1 %	7,4 %

störst effekt för AMA-jorden lerig sand, men uttryckt i totalt översvämmad area är skillnaden ändå liten mellan markmättnadsfallen. En trolig förklaring till att en marginell effekt uppvisas, även om hydrograferna visade på väldigt stora skillnader, kan vara hur hårdgjorda respektive gröna ytor och lågpunkter är lokaliserade inom avrinningsområdet. Var i landskapet grönytor placeras kan ge stor effekt på översvämningsområden. Detta har dock inte analyserats närmare i denna studie. Även där skillnad i totalt översvämmad area inte är markant kan skillnader gällande översvämningskonsekvenser/samhällsskador likväl vara mycket stora lokalt i avrinningsområdet. Detta exemplifieras i Figur 10 som visar skillnad i maximalt vattendjup vid pendeltågspåret i Fagersjö mellan två olika initiala markmättnadsfall för samma jordart, samt i Figur 11 som visar skillnad mellan två olika jordarter för samma initiala markmättnad. Här synliggörs att det på lokal nivå kan skilja ca 1-2 decimeter i vattendjup mellan markmättnadsfallen och uppemot en meter mellan jordartsfallen trots att översvämmad area endast skiljer enstaka procentenheter mellan de olika fallen.



Figur 10. Skillnad i maximalt vattendjup [m] mellan initial markmättnad 95e och 5e percentilen i Fagersjö för lerig sand (AMA Jord A).



Figur 11. Skillnad i maximalt vattendjup [m] i Fagersjö mellan lera och lerig sand (AMA Jord A), båda med initial markmättnad enligt 95e percentilen.

Generellt påvisar resultaten mycket stora skillnader gällande översvämmning mellan de olika jordarterna, men även skillnader mellan de olika fallen av initial markmättnad. Skillnaderna i dessa fallstudier, särskilt Fagersjö, förstärks sannolikt av att avrinningsområdena har relativt stor andel grönytor och naturmark, och effekten i områden med mindre andel grönytor kan därför vara mindre tydlig.

Markpackningens påverkan på översvämningskonsekvenser

Tidigare studier har visat på betydelsen av markpackning för infiltration och ytavrinning där en hårdare packning reducerar infiltrationskapaciteten vilket kan leda till en ökad frekvens, volym och intensitet av ytavrinning (Gregory m.fl., 2006 & Pitt m.fl., 2008). När en markyta belastas komprimeras jorden och porvolymen som kan fyllas med luft och vatten minskar vilket gör att skrymdensiteten ökar. Exempelvis visade Ngo-Cong (2021) att en ökning i skrymdensitet på 10-20 % reducerade den kumulativa infiltrationen med omkring 55-82 %. Kompakterade gröna ytor kan därför närma sig infiltrationen motsvarande hårdgjorda ytor, även om resultaten tyder på en stor spridning mellan olika jordar (Gregory m. fl., 2006). Hur mycket en jord kan packas skiljer sig åt och påverkas bland annat av jordartssammansättning och mättnadsgrad vid packningstillfället. En torr jord kan generellt lättare stå emot kompaktering i jämförelse med en blöt jord (D'Acqui m. fl., 2020).

I urbana miljöer påverkas jordar i hög grad vilket leder till ökad skrymdensitet och därmed försämrade

infiltrationsegenskaper (Pitt m, fl., 2008). När det gäller urbana grönytor finns det risk för att jorden kompakteras dels i byggskedet, dels vid drift och nyttjande. Vid anläggning används ofta stora och tunga maskiner och underliggande jordar med sämre infiltrerande förmåga kan blottläggas och ibland sker utfyllnad av ditfraktade jordar av annan karaktär. När parken är i drift används generellt mindre maskiner så som parkbilar och gräsklippare, men ibland nyttjas tunga maskiner även vid drift eller vid anläggningsprojekt inom befintliga grönytor. Utöver detta kan sportaktiviteter och gångstråk kompaktera ytor ytterligare (Pitt m.fl., 2018).

Det är inte enbart fordonsvikt som avgör kompakteringseffekten utan även bredd på däck påverkar. Studier har visat att tunga fordon med breda däck tenderar att kompaktera jord på djupet, medan lättare fordon med smala däck framförallt kompakterar det översta lagret. Övre jordlagret har dock stor påverkan på infiltrationskapaciteten samt att en lättare vikt som appliceras många gånger kan kompaktera övre lagret mer än en tung vikt som appliceras enbart ett fåtal gånger (Publido-Moncada, 2019). Vidare visade Gregory m.fl. (2006) med sin studie att det viktigaste inte är hur tunga maskiner som kompakterar jorden utan huruvida kompaktering överhuvudtaget förekommit.

En naturlig process som delvis kan återställa packningsgraden hos en jord är tjälprocessen. När marken fryser expanderar markfukten vilket gör att porerna ökar i storlek vilket delvis bibehålls när den sen tinar. Men hur väl tjälen återställer en jords kompaktering beror som så mycket annat av jordartsammansättning och är främst något som återställer jordar med höga lerhalter (Eriksson m, fl., 2019).

Simulering av markpackning och markmättnad med hjälp av hydraulisk markmodell i 1D

I denna del av studien undersöktes hur varierande markpackningsgrad för olika parkjordar i kombination med olika initiala markmättnader påverkar infiltrationskapaciteten. Även här nyttjades den hydrauliska markmodellen i 1D med motsvarande konfiguration som i övriga simuleringar. Samtliga fyra jordar som visas i Tabell 1 användes vid simulering av markpackning.

Packningsgrad baserades på litteraturvärden från fältförsök med liknande jordar (Ngo-Cong, 2021;

Gregory m,fl, 2006) och varierades i modellen genom justering av skrymdensitet och därmed jordhydrauliska parametrar med hjälp av ROSETTA-modellen. Packningsgraderna är specifika för respektive jordart och utgår från en skala mellan icke kompakterad jord och maximal packningsgrad enligt litteraturvärden. Se sammanställning av jordarnas packningsgrader och justerade värden på skrymdensitet i Tabell 5. Modellen kördes med CDS-regn med en varaktighet på två timmar och återkomsttider om 2-, 10-, respektive 100 år och en upplösning på 5 minuter. Som ett mått på ytavrinning sammanställdes avrinningskoefficienter för respektive packningsgrad.

Studier har visat att skrymdensiteten generellt för urbana grönytor kan öka med ca 0,30-0,40 g/cm³ och gröna idrottsytor ca 0,38-0,56 g/cm³ (Schueler, 2000).

Tabell 5. Jordarnas skrymdensitet för respektive packningsgrad som anges i procent för varje kompakteringssteg.

Kompaktering	Lera		Lerig sand		Siltig sand		Sand	
	[g/cm ³]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[g/cm ³]	[%]
Steg 0	1,39	0	1,37	0	1,30	0	1,49	0
Steg 1	1,46	5	1,49	9	1,42	9	1,58	6
Steg 2	1,53	10	1,60	17	1,52	17	1,67	12
Steg 3	1,60	15	1,71	25	1,63	25	1,73	16

Detta till följd av anläggning men också för att de fortsätter att kompakteras flera år efter anläggningsfasen. En ökning av skrymdensitet på denna nivå motsvarar i princip den maximala kompakteringsgraden som simulerats i denna studie. För att vara en funktionell jord i urbana miljöer när det gäller växtlighet finns det en begränsning gällande skrymdensiteten som varierar beroende på jordart, exempelvis för sand 1,8 g/cm³, lerig sand 1,7 g/cm³ och lera 1,4 g/cm³ (Schueler, 2000). Notera att dessa värden är relativt höga i relation till de som valts att simuleras i modelleringen.

Resultat markpackningens och markmättnadens effekt på ytavrinning

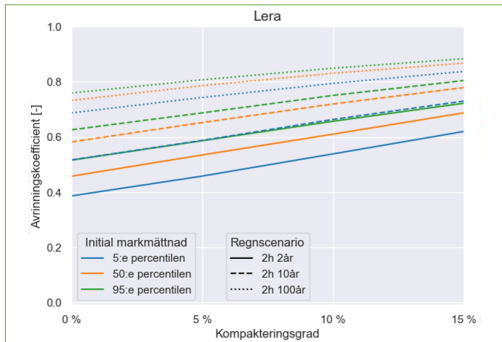
Resultat från simuleringarna visas nedan i Figur 12 till Figur 14 för lera, lerig sand (AMA-parkjord A) och siltig sand (AMA-parkjord B). I figurerna visas hur avrinningskoefficienten (och därmed ytavrinning) beror av packningsgraden och initial markmättnad. Simuleringarna med ren sandjord genererade inte ytavrinning

för något fall, vilket motsvarar en avrinningskoefficient lika med noll, och därför är inte sandjorden presenterad i någon graf. Det kan dock vara värt att notera att varken 1D eller 2D modellen i denna studie tar hänsyn till horisontella grundvattenflöden och det är möjligt att vatten som infiltrerat i en urban grönyta kan bidra till utströmmande grundvatten i nedströms delar av staden, och därmed ändå orsaka ytvattenflöden i staden, om än

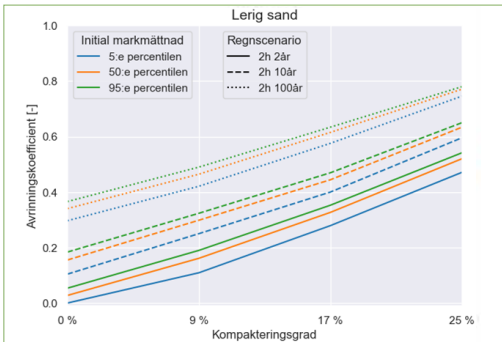
fördröjda sådana. Dylika aspekter diskuteras inte närmare i denna studie.

Resultatet från simuleringar med lera tyder på att kompaktering inte markant förändrar ytvavrinningen vid skyfall från täta jordar som redan opåverkade har kraftigt begränsad infiltrationskapacitet. Tydligare påverkan på ytvavrinningen från lera kan dock ses vid lågintensiva regn. Detta tycks gälla för både markpackning och initial markmättnad, där ett extremt regn (100-års) generer mycket hög ytvavrinning redan vid låg initial markmättnad respektive låg packningsgrad medan avrinningskoefficienten kan öka med ca 50 % vid måttligt kraftiga regn (2- och 10-års) vid högre packningsgrad. En noterbär ökning, upp till ca 25 %, i avrinning kan även ses när den initiala markmättnaden ändras.

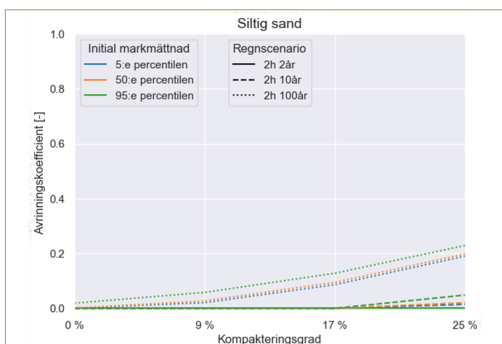
När det gäller AMA-parkjordarna som är mer genomsläppliga ser det annorlunda ut. Stor påverkan av markpackningen kan framförallt ses för lerig sand (AMA Jord A) som har en sandhalt på ca 60 %. Här kan avrinningskoefficienten öka med upp till en faktor tre mellan icke kompakterad och kompakterad jord. Den initiala markmättnaden har mindre påverkan än markpackningen för AMA-parkjordarna, men även markmättnaden har en tydlig effekt på avrinningskoefficienten och ger en ökning om ca 0,1 enheter. Under väldigt mättade förhållanden och hög kompakteringsgrad uppnås liknande avrinningskoefficienter för lerig sand (AMA jord A) som för leran, framförallt för extrema regn. Siltig sand (AMA Jord A/B) genererar generellt ingen ytvavrinning med undantag för vid extrema regn i kombination med hög markpackning. Markmättnaden har endast marginell effekt på ytvavrinning från sand (AMA Jord B). Huvudskillnaden vad gäller material med hög genomsläpplighet är att AMA Jord A innehåller 60 % sand medan AMA-jord B innehåller 80 % sand. Den förhållandevis mätliga skillnad i sandinnehåll mellan lerig sand och siltig sand (ökning från 60 % till 80 %) tycks utifrån resultaten ha mycket stor betydelse för avrinningen. Då sandinnehållet ligger omkring 80 % genereras knappt någon ytvavrinning alls vid måttligt höga regn oavsett markpackning och initial markmättnad samt begränsad ytvavrinning även vid extremregn. Lerig sand ger däremot en betydligt högre ytvavrinning som dessutom ökar med högre initial markmättnad och kan öka mångfaldt med högre markpackningsgrad.



Figur 12. Avrinningskoefficientens koppling till initial markmättnad och markpackningsgrad för lera.



Figur 13. Avrinningskoefficientens koppling till initial markmättnad och markpackningsgrad för lerig sand.



Figur 14. Avrinningskoefficient redovisat mot markpackningsgrad för siltig sand.

Ett intressant delresultat från simuleringarna är hur tydligt avrinningskoefficienten ökar med regnets intensitet/återkomsttid. Detta tycks gälla oavsett jordart (förutom ren sand där ingen ytvavrinning alls uppstår). Hur hänsyn till detta kan beaktas vid beräkning av dagvattenflöde och fördröjningsvolym diskuteras närmare i en annan artikel i Tidskriften Vatten (Larm et al., 2023).

Fältförsök i svenska parkmiljöer

Under examensarbeten med fältstudier utförda i samarbete med Tyréns AB under åren 2022-2023 togs jordprover vid ett flertal parkmiljöer i Uppsala, med olika underliggande jordarter, varefter laboratorieförsök gjordes där bland annat skrymdensitet beräknades (Nilsson, 2023; Novikova, 2023). Försöken visade på ett brett spann av skrymdensiteter mellan 1,04-1,62 g/cm³ där majoriteten av jordarna klassades som lerig eller siltig sand. Resultatet visar på en stor heterogenitet mellan olika parker, men även inom en och samma parkmiljö. Värdena indikerade även att vissa parkytor har en hög packningsgrad då skrymdensiteter uppemot 1,6 g/cm³ närmar sig de värden på skrymdensitet som använts för att simulera packning på 17-25 % (se Tabell 6). Dessa mätdata, tillsammans med simuleringarna av markpackningens inverkan på infiltrationskapacitet, tyder på att markpackning kan vara en betydande faktor för ytvavrinningens omfattning i svenska parkmiljöer.

Inom ett av examensarbetena gjordes även kompakteringsförsök i parkmiljö, med personbil, där infiltrationskapacitet före och efter kompaktering studerades. Resultaten indikerade att även nyttjande av fordon med personbilsstorlek tydligt kan påverka infiltrationskapaciteten i parkmiljöer (Novikova, 2023).

Slutsatser

Resultaten från såväl fallstudierna som de generella 1D avrinningsmodelleringarna pekar i samma riktning – jordarten i våra parkmiljöer är helt central för vilken avrinning, och därmed vilka översvämningrisker, som kan uppstå. Därtill indikerar resultaten att även markpackning kan ha mycket stor betydelse, men effekten är beroende av vilken jordart som anlagts i parkmiljön. En viktig och glädjande iakttagelse är att siltig sand (AMA-jord A/B, med 80 % sand) som har mycket goda infiltrationsegenskaper även är relativt ökänslig

för markpackning. Den förhållandevis begränsade ökningen av sandinnehåll i denna studies AMA-jord A (lerig sand) från 60 % till 80 % i AMA Jord A/B (siltig sand) tycks således kraftigt förbättra en parkmiljös möjlighet att minska översvämningsekvenserna i en stad. Därtill är det översta lagret viktigast för infiltrationen och det är därför sannolikt att parkanläggning med sandrik jord enbart i övre jordlagret kan ge mycket positiva översvämningdämpande effekter, även om jordlagren på större djup har tätare jordarter.

Om grönytor likväl anläggs med packningskänsliga jordar är det av stor vikt att beakta maskinval, vid såväl anläggning som drift, för att inte försämrade grönytors infiltrationskapacitet. Vid vissa jordtyper, såsom jordar med högt lerinnehåll, kan tjälen återställa kompakteringskadade jordar, men inte alltid fullt ut och vid drift kan kompaktering ändå återkomma under grönsäsongen. Effekten på stadsnivå av kompaktering beror självfallet på hur stor del av stadens grönytor som kompakterats. Är det endast mycket begränsade delar kan påverkan var begränsad, medan det vid större ytor kan ha påtaglig effekt på stadens översvämningrisker. Mätvärden från tidigare studier av generell ökning i skrymdensitet för park och idrottsytor ligger dock nära de värden som använts i denna studie för den maximala kompakteringen (uppemot 25 %), varför det ändå är sannolikt med en omfattande påverkan från markpackning i parkmiljöer. Enligt resultatet från denna studie kan detta ha en mycket stor påverkan på översvämningrisker i städer.

Såväl jordart som markpackning är designfaktorer som kan påverkas vid nyanläggning av grönytor. Annorlunda är det med initial markmättnad, som beror av vädersituationen inför det specifika regntillfället, och som inte kan påverkas vid design. I viss mån kan känsligheten för initial markmättnad påverkas genom jordartsval, men likväl är markmättnad en icke planerbar faktor som behöver tas hänsyn till vid riskbedömning av översvämningseffekter. Trots att effekten av markmättnad är påtaglig är den ändå underordnad i betydelse jämfört med val av jordart. Markpackningens betydelse är svårare att generalisera eftersom den, som ovan nämnts, beror på hur stora ytor som kompakterats och kan på stadsdelsnivå förväntas ge allt från mycket stor översvämningpåverkan till liten påverkan beroende på hur stor andel som kompakterats.

Studiens resultat visar, utöver stora möjligheter till att motverka klimateffekter och minska översvämningsrisker med aktiv parkdesign och medveten drift, även att ytavrinningen kan variera markant beroende på jordart, initial markmättnad och kompakteringsgrad, såväl som beroende på återkomsttid/intensitet för aktuellt nederbördstillfälle. Utöver medveten design med högt sandinnehåll i parkjordarnas övre lager och begränsad markpackning vill vi därför även rekom-

mendera en genomtänkt ansättning av infiltration vid dagvatten- och skyfallsberäkningar, som tar hänsyn till platsspecifika egenskaper hos grönytor samt tar hänsyn till en för respektive beräkningsfall aktuell regnintensitet. I enklare analyser såsom med Rationella metoden kan jordartsspecifika avrinningskoefficienter nyttjas. I mer avancerade avrinningsmodeller kan metoden som utvecklats i denna studie utredas vidare för att på så viss nyttjas till platsspecifika infiltrationsbeskrivningar.

Referenser

- AMA Anläggning 20 (2020) Allmän material-och arbetsbeskrivning för anläggningsarbete. Svensk byggfjänt. ISBN: 978-91-7917-017-2
- Barkefors, D. (2023) The Influence of Infiltration Capacity and Antecedent Soil Moisture Conditions on Urban Pluvial Flooding. (Masteruppsats 30 hp) Uppsala Universitet. Institutionen för Geovetenskaper, luft-, vatten- och landskapslära.
- Cleveland, T.G., Thompson D.B & Fang, X. (2011) Use of the Rational and Modified Method for Hydraulic Design. Texas Department of Transportation.
- D'Acqui, L.P., Certini, G., Cambi, M. & Marchi, E. (2020) Machinery's impact on forest soil porosity. *Journal of Terra-mechanics* 91, 65–71.
- DHI (2023) MIKE+ User Guide, 2D Overland.
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2019) Marklära, Studentlitteratur.
- Gregory, J.H., Dukas, P.H & Miller, G.L. (2006) Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Groenendyk, D., Ferré, T., Thorp, K & Rice, A. (2015) Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for improved Visualization of Landscape Function. *PloS one*. 10. e0131299. 10.1371/journal.pone.0131299.
- Hernebring, C. (2006) 10års-regnets återkomst, förr och nu - regndata för dimensionering/kontroll-beräkning av VA-system i tätorter. (No. 2006–04), VA-Forsk. Svenskt Vatten AB.
- Larm, T., Wahlsten, A., Kjellin, J., Ekeröth, S., Olsson, J. och Broekhuizen, I. (2023) Grönområdets och designregns påverkan på avrinningskoefficienter för dimensionering av dagvattenanläggningar. *Vatten*, 79(4) 160-174 (detta nummer).
- Larsson, R (2008) Jords egenskaper, Information 1. Sveriges Geologiska Institut (SGI) Linköping.
- Ngo-Cong, D., Antille, D., van Genuchten, M. Th, Nguyen, H., Tekeste, M., Baillie, C & Gowdin, R. (2021) A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration. *Soil Science Society of America* 2021;85:1931-1945. DOI: 10.1002/saj2.20328
- Nilsson, E. (2023) Surface Runoff on Green Urban Areas: A study on driving forces behind surface runoff generation. (Masteruppsats 30 hp) Uppsala Universitet. Institutionen för Geovetenskaper, luft-, vatten- och landskapslära.
- Novikova, A. (2023) Soil compaction and the effect on infiltration in urban green environments: A study based on field measurements and HYDRUS 1D modellering (Masteruppsats 30 hp) Sveriges lantbruksuniversitet/Uppsala Universitet. Institutionen för Geovetenskaper, luft-, vatten- och landskapslära.
- Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L. & Yang, W. (2017) Extremregn i nuvarande och framtida klimat – Analyser av observation och framtidsscenarier. *Klimatologi* nr 47 SMHI.
- Persson, M., Selim, T. & Olsson, J. (2019) Groundwater contamination risks from conservative point source pollutants in a future climate. *Hydrological Sciences Journal* Vol. 64, No 13, 1659-1671.
- Pitt, R., Chen, S-E., Clark, S., Swenson, J & Ong, C.K. (2008) Compaction's impacts on urban storm-water infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2008, 134(5):622-658. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:5(652)
- Schaap, M. G., Feike, J. L & van Genuchten, Martinus Th (2001) ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251(2001) 163-176, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- Schueler, T. (2000) The Compaction of Urban Soil: The Practice of Watershed Protection. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD. Pages 210-214 Conservation, urban, watershed, Soil, Compaction.
- SGF/BGS (2001) SGF/BGS Beteckningssystem för geotekniska utredningar version 2001:2. Sveriges Geotekniska Förening (SGF) och Byggnadsgeologiska Sällskapet (BGS).
- Šimúnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M & van Genuchten, M.Th. (2009) The HYDRUS-1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media Version 4.08. Department of Environmental Sciences University of California Riverside.
- SMHI (u.d.) Skyfallsstatistik: Regional statistik för extrema korttidsregn. <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat-skyfallsstatistik-regional-statistik-for-extrema-korttidsregn-> [2023-04-27]
- Svensk Försäkring, (2022) Rekordhöga skadebelopp efter översvämnningar 2021. <https://www.svenskforsakring.se/aktuellt/nyheter/2022/rekordhoga-skadebelopp-efter-oversvamnningar-2021/> [2023-11-06]
- Svenskt Vatten (2011) Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem. Publikation P104 Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten (2019) Avledning av dag-, drän- och spillvatten. Publikation P110 Svenskt Vatten AB.
- Van Genuchten, M.Th. (1980) A Closed-form Equation For Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:832-898