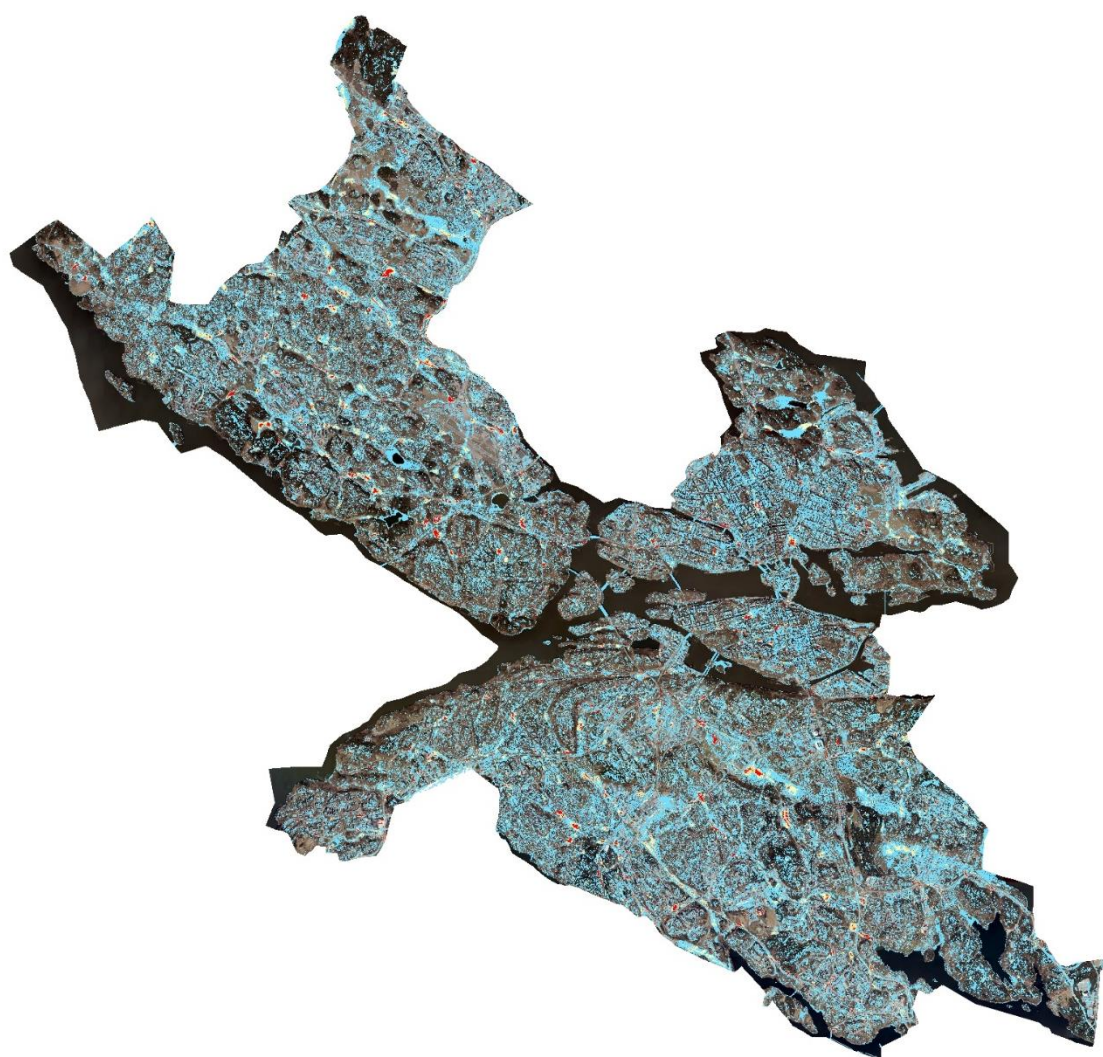


STOCKHOLM VATTEN OCH AVFALL

SKYFALLSMODELLERING STOCKHOLM STAD

RAPPORT

2018-06-13



wsp

SKYFALLSMODELLERING STOCKHOLM STAD

Stockholm Vatten och avfall

Henny Samuelsson
Stockholm Vatten och Avfall
106 36 Stockholm
Besök: Bryggerivägen 10

KONSULT

WSP Bro & Vattenbyggnad

121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7
Tel: +46 10 7225000
WSP Sverige AB
Org nr: 556057-4880
Styrelsens säte: Stockholm
www.wsp.com

KONTAKTPERSONER

Sofia Thurin
010-722 83 05
sofia.thurin@wsp.com

Frida Toren
010-722 95 71
Frida.toren@wsp.com

UPPDRAGSNAMN
Ny skyfallskartering Stockholm stad

UPPDRAGSNUMMER
10255910

FÖRFATTARE
Sofia Thurin

DATUM
2018-06-13

ÄNDRINGSDATUM

Granskad av
Gunilla Kaiser

Godkänd av
Sofia Thurin

SAMMANFATTNING

WSP har på uppdrag av Stockholm Vatten utfört en uppdaterad skyfallsmodellering för Stockholm stad. I den uppdaterade modelleringen har två beräkningsscenarier utförts, ett 100-årsregn och ett regn motsvarande det som föll över Köpenhamn 2011.

Syftet med karteringen är att få en översyn av vilka områden inom staden som skulle kunna drabbas av översvämningar vid ett skyfall.

En hydrodynamisk modell som beskriver markavrinningen har satts upp för hela Stockholms stad och de områden som rinner in till staden från angränsande kommuner. För beräkningarna har programmet MIKE 21 använts som är ett tvådimensionellt beräkningsprogram framtaget av DHI.

Skyfallsmodelleringen har utförts med en höjdmodell med en gridstorlek på 4 × 4 m. 100-årsregnet har beskrivits som ett CDS-regn med en total varaktighet på 6 h, en total volym på 105,7 mm och en topp på regnet som pågår i 30 min med en volym på 55,6 mm. 100-årsregnet har simulerats med en klimatfaktor på 1,25 för att ta höjd för det klimat som kan förväntas råda år 2100. Infiltrationen i marken beskrivs i skyfallsmodellen för Stockholm med hjälp av en infiltrationsmodul som beräknar infiltrationen baserat på ett antal parametrar. Utöver regnets utseende och infiltrationen i marken beskrivs hur snabbt vattnet rinner av på markytan mha differentiering av markens råhet samt att ett schablonavdrag görs för ledningsnätets kapacitet.

Resultaten från skyfallsmodelleringen redovisas som GIS-skikt. För de två beräkningsscenarierna har följande GIS-skikt tagits fram:

- Maximala vattendjup
- Maximala flödeshastigheter
- Vattendjup vid simuleringslut

Resultaten har satts ihop till sammanhängande resultatfiler (GIS-skikt) för hela Stockholm stad. Utöver dessa har fler resultat från simuleringarna sparats i dfs-2 format (t.ex. vattenhastighet och infiltrerad volym). Dessa kan transformeras till ascii-filer och sättas samman för vidare analys.

Materialet som har tagits fram är avsett för att användas som planeringsunderlag och man bör inte i detalj studera beräknade vattennivåer och dra för långtgående slutsatser. Tolkningen av resultaten bör göras mot de förenklingar och generaliseringar som ligger till grund för resultaten.

Det är också viktigt att poängtera att resultaten från skyfallsmodelleringen bara redovisar marköversvämningar till följd av skyfall och inte de översvämningar som sannolikt skulle uppkomma i källare och liknande utrymmen till följd av överbelastade avloppssystem. Resultaten redovisar inte heller översvämningar till följd av höga vattennivåer i vattendrag, grundvattennivåer eller havsvattenstånd.

Resultaten av skyfallsmodelleringen kan användas för bedömning av ett skyfalls påverkan på ex samhällsviktig verksamhet, beredskapsplaner och som underlag för riskanalyser. Dessutom kan resultaten användas för prioritering av områden för mer detaljerade studier där konsekvenserna bedöms vara stora och det finns behov för framtagande av åtgärdsförslag i form av lämpliga modifieringar i terrängen, såsom placering av fördröjningsmagasin, skyddsvallar och alternativa ytliga avledningsvägar.

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	3
1 INLEDNING	5
1.1 FÖRUTSÄTTNINGAR	5
1.2 UNDERLAG	5
1.3 LEVERERAT MATERIAL	5
2 BAKGRUND	6
3 METOD	6
3.1 TERRÄNGMODELL	6
3.1.1 Uppdelning i beräkningsområden	7
3.2 REGN	8
3.3 MARKANVÄNDNING	9
3.4 INFILTRATION	10
3.5 MARKENS RÅHET	12
3.6 KALIBRERING	12
3.7 FÖRENKLINGAR OCH GENERALISERINGAR I MODELLEN	13
4 RESULTAT	13
4.1 TOLKNING AV RESULTAT	14
4.2 ANVÄNDNING AV RESULTAT	14
4.3 JÄMFÖRELSE AV RESULTAT FRÅN SKYFALLSMODELLERING 2015	14
5 SLUTSATSER	15
6 FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE	16
7 REFERENSER	16

1 INLEDNING

WSP har fått i uppdrag av Stockholm Vatten att uppdatera den skyfallsmodell som WSP upprättade åt Stockholm Vatten och Stockholm stad 2015. Syftet med karteringen är att få en översyn av vilka områden inom kommunen som skulle kunna drabbas av översvämningar vid ett skyfall. Syftet med uppdateringen är att få en bättre beskrivning av infiltrationen samt enklare tolkning av resultaten då vi simulerar endast ett nederbördsscenario per återkomsttid på regnet. Skyfallsmodelleringen utförs för två scenarier, 100-årsregnet och ett regn som motsvarar det regn som föll över Köpenhamn 2011.

Enligt Boverkets riktlinjer (Boverket, 2018) behöver översvämningsrisken till följd av skyfall beaktas vid planläggning. Som ett minimum bör ny sammanhållen bebyggelse och bebyggelse med samhällsviktig verksamhet planläggas så att den årliga sannolikheten för översvämning är mindre än 1/100. Vid planläggning av verksamheter av större samhällsviktig betydelse eller verksamheter där översvämning leder till särskilt stora konsekvenser, såsom räddningstjänst och större sjukhus bör betydligt kraftigare skyfall med längre återkomsttider kunna hanteras. Dessutom behöver effekten av ett framtida klimat beaktas.

Denna utredning beaktar endast översvämning till följd av skyfall. Översvämning till följd av höga flöden i vattendrag, höga havsvattennivåer och höga grundvattennivåer har inte beaktats och behöver för att få en komplett bild av översvämningsrisken inom ett område beaktas separat.

1.1 FÖRUTSÄTTNINGAR

Koordinatsystemet som använts i beräkningarna och vid framtagande av terrängmodell är SWEREF 99 18 00 och höjdsystemet är RH 2000.

1.2 UNDERLAG

Följande underlag har använts vid framtagandet av skyfallsmodellen för Stockholm stad.

- Terrängmodell framtagen av WSP 2016 baserad på 1 m punktlager
- Terrängmodell framtagen av WSP 2015 utifrån NNH-data
- Hårdgöringsraster över Stockholm stad och Huddinge kommun, Tyréns 2017
- Byggnadsgeologikarta över Stockholm stad
- Jordartskarta
- Markanvändningsraster framtagen av WSP 2015

1.3 LEVERERAT MATERIAL

Följande har levererats utöver denna rapport:

- GIS-skikt med beräknade maximala vattendjup, maximala flöden och vattendjup efter 6 h
- Jämförelseskikt med skyfallsmodelleringen från 2015
- Modellresultat i dfs-2 format
- Hydrodynamiska modeller
- Kortfattat PM för målgrupp med begränsad erfarenhet av beräkningsmodeller

2 BAKGRUND

SMHI:s definition av skyfall är minst 50 mm nederbörd på 1 h eller minst 1 mm på en minut. Nästintill alla skyfall inträffar sommartid och har liten geografisk utsträckning (SMHI, 2018).

Enligt IPCC:s senaste rapport AR5 (IPCC, 2013) kommer den globala medeltemperaturen höjas med upp till 4 grader fram till 2100 jämfört med perioden 1986-2005 (scenario RCP8,5). Effekterna av uppvärmningen och klimatförändringarna syns redan idag i form av förändrade nederbördsmönster, stigande havsnivåer, översvämningar, erosion, torka och värmeböljor vilka i sin tur kan leda till konsekvenser för samhället och samhällsviktig verksamhet. Antalet dagar med kraftig nederbörd förväntas öka och även extremt korttidsregn att öka i frekvens och intensitet. Detta medför att översvämningar till följd av skyfall kommer att öka.

Dessutom ökar riskerna med skyfall i och med urbaniseringen, att befintliga områden förtätas så att mer hårdgjorda ytor skapas där vattnet inte kan infiltrera.

Klimatförändringarna och förtätningen ökar således översvämningsrisken till följd av skyfall i våra städer. Med ett förebyggande arbete med kartering av översvämningsriskerna vid skyfall och arbete med anpassning för att minska konsekvenserna vid skyfall kan Stockholm stad vara bättre förberedda på kommande skyfall.

WSP utförde under 2014 och 2015 en skyfallsmodellering för Stockholm stad på uppdrag av Stockholm Vatten och Stockholm stad. Skyfallsmodelleringen 2015 utfördes för ett 100-årsregn och utfördes som en känslighetsanalys med tre scenarier med olika konservativa antaganden gällande infiltrationen i marken och ledningsnätets kapacitet. Infiltrationen i marken beskrevs i modellen från 2015 med ett schablonavdrag baserad på typ av markanvändning. Sedan modellen skapades 2015 finns det nu möjlighet att beskriva infiltrationen vid skyfall mer dynamiskt vilket nu Stockholm stad vill göra.

3 METOD

En hydrodynamisk modell som beskriver markavrinningen har satts upp för hela Stockholms stad och de områden som rinner in till staden från angränsande kommuner. För beräkningarna har programmet MIKE 21 använts som är ett tvådimensionellt beräkningsprogram framtaget av DHI. Programmet beräknar vattennivå- och flödesförhållanden, i detta fall till följd av nederbörd som faller på marken. Beräkningarna baseras på numerisk lösning av Navier-Stokes ekvationer.

Metoden för markavrinning som tillämpats följer *Vägledning för Skyfallskartering* (MSB, 2017). Med metodiken görs förenklingar bland annat avseende beskrivning av ledningssystemets kapacitet och hur vattnet transporteras i vattendrag.

Skyfallsmodellen för Stockholm har byggts upp av terrängmodell, beskrivning av nederbördsbelastning, infiltration i marken vilket differentierats beroende på markanvändning och underliggande jordart samt beskrivning av hur snabbt vattnet rinner av på markytan mha markens råhet.

3.1 TERRÄNGMODELL

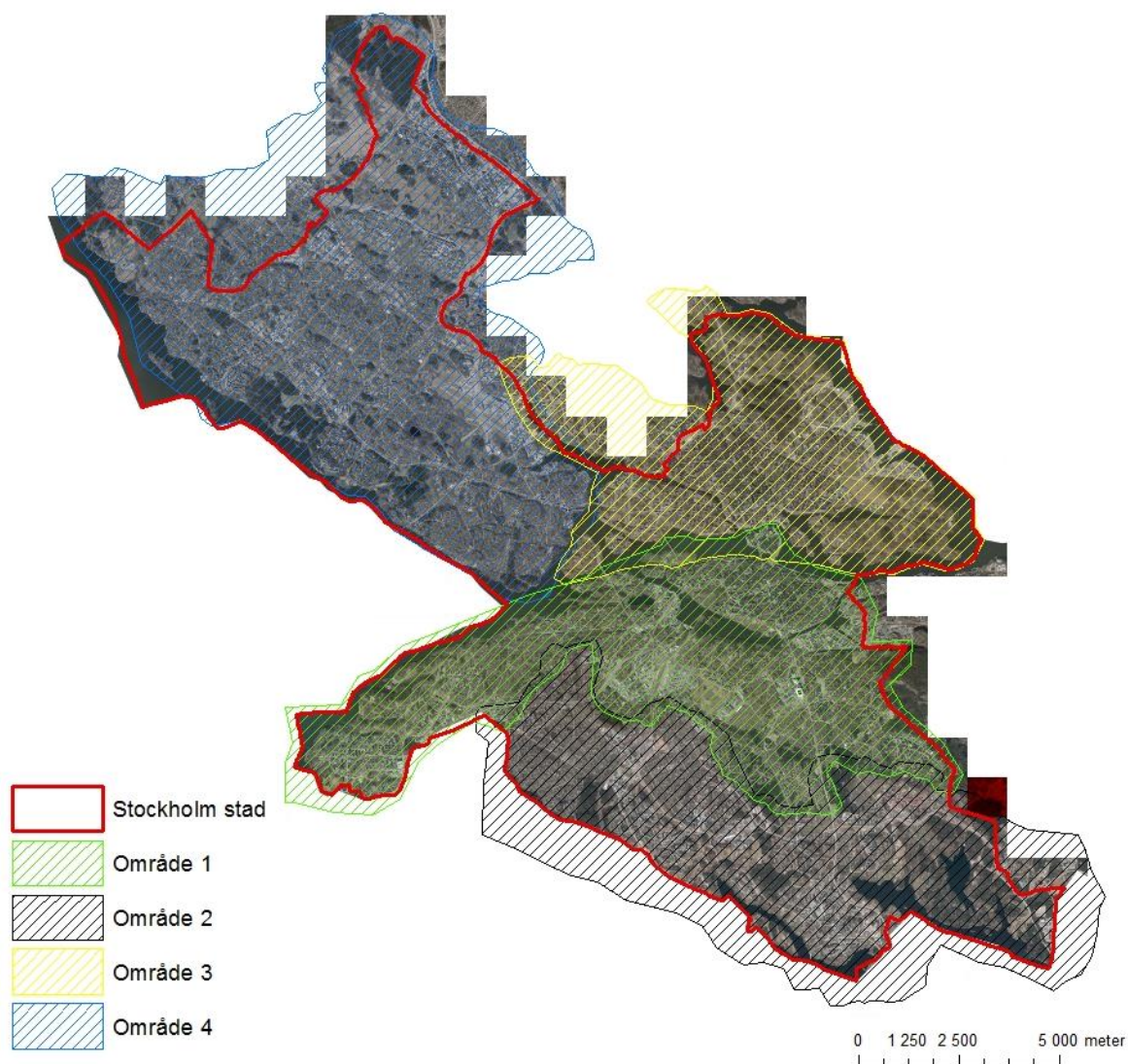
Som underlag till höjdmodellen för skyfallsmodellen har den höjdmodell som togs fram av WSP 2016 använts inom Stockholm stad och utanför Stockholm stad har höjdmodellen som togs fram för skyfallsmodelleringen 2015 använts. Höjdmodellen som har använts har en gridstorlek på 4 × 4 m.

Höjdmodellen har bearbetats för att beskriva de verkliga vattentransportförhållandena, dvs byggnader har höjts upp och broar har sänkts ner så att höjdmodellen visar nivån på vägbanan eller vattendraget. Generellt har höjdmodellen inte korrigerats för kulvertar med undantag för kulvertar i Bällstaån, Nälstaån och Käppaladiket och i Rågsved. För de kulvertar som höjdmodellen har korrigerats för har en ruta i höjdmodellen öppnats upp.

För sjöar och vattendrag har inga korrigeringar gjorts i höjdmodellen eftersom nivåerna i vattendragen och sjöarna ska spegla vattenståndet en normal sommardag när det är rimligt att ett skyfall inträffar.

3.1.1 Uppdelning i beräkningsområden

För att göra beräkningarna möjliga (för att inte få orimligt långa beräkningstider) delades Stockholms stad upp i fyra beräkningsområden, se Figur 1. Uppdelningen bygger på SMHI:s avrinningsområden (SMHI:s databas SVAR, Svenskt Vattenarkiv) samt kontroll och justeringar med hjälp av flödesvägar på markytan som tagits fram utifrån terrängmodellen. Områdena delades in så att de delvis överlappade varandra för att inte få så kallade randeffekter, att vatten felaktigt samlas vid gränsen mellan områden.



Figur 1 Stockholms stad (röd linje) delades in i fyra beräkningsområden. Beräkningsområdena går utanför kommungränsen för att få med hela avrinningsområdet och därmed den tillrinning som kan ske till staden.

3.2 REGN

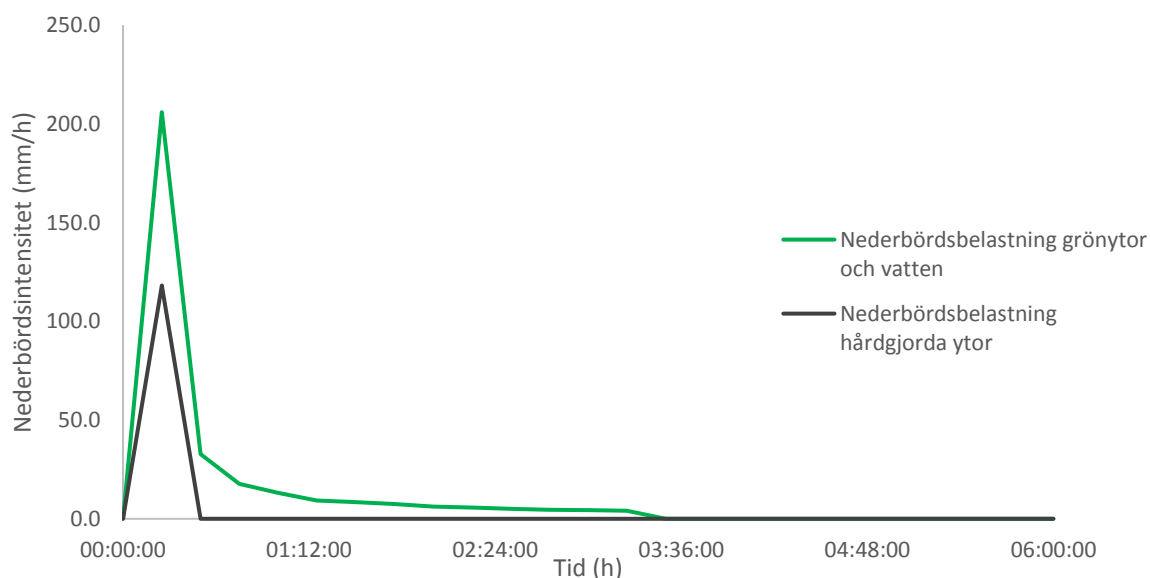
I Vägledningen för Skyfallskartering (MSB 2017), rekommenderas att skyfallskarteringar utförs för ett 100-årsregn samt för ett regn med högre återkomsttid på upp till 1000 år. Lämpligen beskrivs regnet som ett CDS-regn som består av flera blockregn med olika varaktigheter för en viss återkomsttid. Vilken varaktighet som ska användas kopplat till återkomsttiden på regnet anges inte i riktlinjerna varmed det är upp till respektive kommun att bestämma vad man vill modellera.

Stockholm Vatten och Stockholm stad har valt att simulera ett CDS-regn med 6 h varaktighet med en klimatkfaktor på 1,25. Total volym är 105,7 mm.

Det 6 h långa CDS-regnet delas upp i tre delar, förregnet, topp (peak) och efterregnet. Under förregnet faller totalt 25 mm. Under förregnet antas ledningsnätet ha tillräcklig kapacitet för att avleda nederbördsvolymen från de hårdgjorda ytorna och för grönytorna antas att nederbördsvolymen infiltrerar i marken och fyller upp vattenmättnaden i marken. Med detta följer att ingen avrinning antas uppkomma under förregnet. Toppen på regnet pågår i 30 minuter och då faller totalt 55,6 mm. Under toppen antas ledningsnätet kunna avleda volymen av ett 10-årsregn med en klimatkfaktor på 1,25, således 29,5 mm. Under efterregnet faller totalt 25 mm. Under efterregnet antas att ledningsnätet ha tillräcklig kapacitet för att avleda nederbördsvolymen från de hårdgjorda ytorna medan infiltrationen på grönytorna får fortgå som under toppen på regnet.

För att ta hänsyn till ledningsnätets kapacitet har ett schablonavdrag gjorts på nederbörden motsvarande att ledningsnätet har kapacitet att avleda ett 10-årsregn med klimatkfaktor på 1,25.

I skyfallsmodelleringen i MIKE 21 tas endast toppen och efterregnet med eftersom ledningsnätet antas ha kapacitet att avleda förregnet och infiltrationen i marken bedöms tillräcklig för att infiltrera nederbörden. För att få med avrinningen från hela avrinningsområdet är det viktigt att låta beräkningen pågå även ett antal timmar efter det att det slutat regna. Totalt simuleras 6 h där de första 30 min utgörs av toppen på regnet. Regnet simuleras med ett tidssteg på 15 min. I Figur 2 redovisas hur nederbördsbelastningen för hårdgjorda ytor, grönytor och vattenytor har beskrivits i skyfallsmodellen.

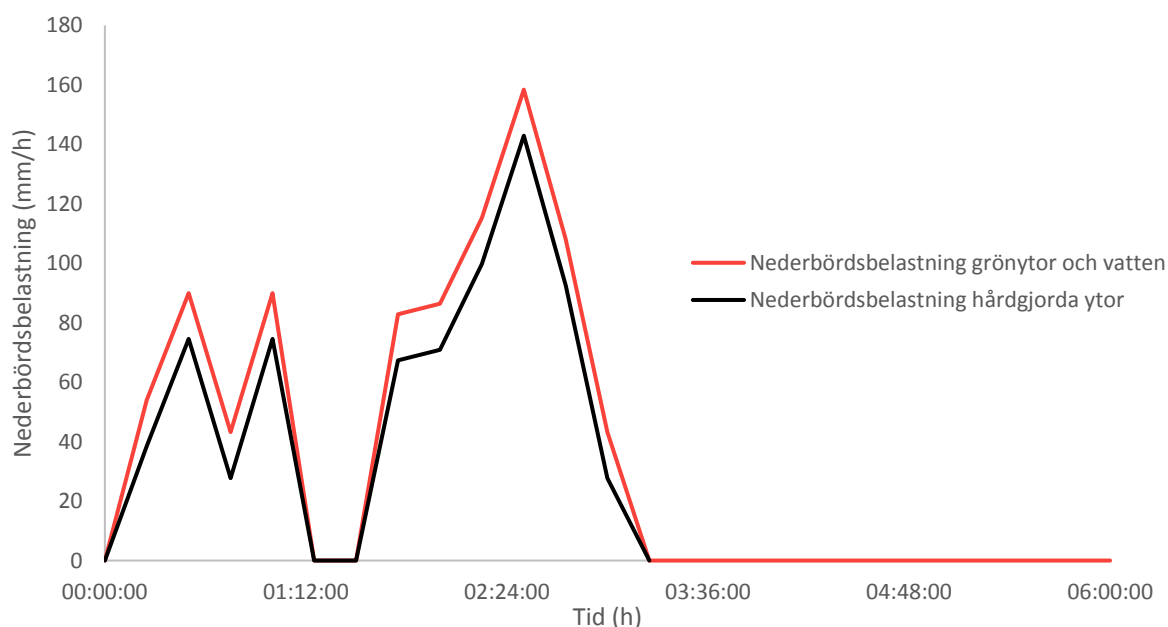


Figur 2 Nederbördsbelastning i skyfallsmodelleringen för hårdgjorda ytor (svart), grönytor och vattenytor (grön).

Total nederbördsvolym för hela regneventet är i skyfallsmodellen 105,7 mm. Maximal regnintensitet för regnets mest intensiva minuter är 205,9 mm/h vilket motsvarar en intensitet för ett 100-årsregn med ca

7 min varaktighet, medelintensiteten under regnets 30 min långa topp motsvarar intensiteten för ett 100-årsregn med 30 min varaktighet.

Eftersom det är stora osäkerheter i statistiken för regn med en återkomsttid på över 100 år har Stockholm Vatten och Stockholm stad valt att simulera ett regn med storlek och intensitet motsvarande regnet som föll i Köpenhamn 2011. Det är det kraftigaste regn som har förekommit i närheten av Sverige i nutid i urbanmiljö. Det ger en god bild att använda för krisberedskap även om man inte använder detta scenario för att planlägga staden efter. Köpenhamnsregnet beskrivs i modellen med en förenklad form med endast förändring i intensitet över tiden och inte i rummet. Regnet har lagts in med utgångspunkt från redovisade intensiteter i Vejret, 128, august 2011 från den plats inom Köpenhamn som fick den största uppmätta nederbördsvolymen. På grönytor har regnet lagts in med en total volym av 145 mm och på de hårdgjorda ytorna har ett avdrag gjorts för ledningsnätets kapacitet baserat på att ledningsnätet kan avleda ett 10-årsregn med den varaktighet på regnet som simulerats. I Figur 3 redovisas hur nederbördsbelastningen för hårdgjorda ytor, grönytor och vattenytor har beskrivits i skyfallsmodellen för scenariot med Köpenhamnsregnet.



Figur 3 Nederbördsbelastning i skyfallsmodelleringen med Köpenhamnsregnet för hårdgjorda ytor (svart), grönytor och vattenytor (röd).

De regn som har simulerats bör ses som ett dimensionerat nederbördsevent och inte tolkas som ett regn som faktiskt kan uppkomma. Eftersom utseendet på ett verkligt regn är mycket komplex med variation både rumsligt och över tiden vad gäller varaktighet och intensitet är dessa verkliga regn inte lämpliga för en skyfallsmodell med syfte att över ett helt område kartera risken för översvämning till följd av skyfall.

3.3 MARKANVÄNDNING

För differentiering av markanvändningen har det hårdgöringsraster som erhållits från Stockholm Vatten använts inom Stockholm stad samt för de delar som rinner in till Stockholm stad och ligger inom Huddinge kommun. I hårdgöringsrastret delas markanvändningen upp i följande kategorier:

- Tak
- Vägar
- Grönytor

- Vatten

Hårdgöringsrastret är ett raster som har tagits fram i syfte att få en mer korrekt fördelning mellan hårdgjorda ytor och grönytor genom att få en mer rättvis beskrivning av ex. gatans varierande bredd, storlek på parkeringsytor samt hårdgjorda ytor inom gårdsmark och industriområden än vad som erhålls med Stockholm stads stadskarta. Rastret har tagits fram mha bildanalys av IR-foton, för utförligare beskrivning, se Tyréns (2017).

För de delar av beräkningsområdet som ligger utanför Stockholm stad har markanvändningsrastret som WSP tog fram 2015 använts och klassats om för att matcha kategorierna i hårdgöringsrastret.

Markanvändningen ligger till grund för beskrivningen av infiltrationshastigheten på grönytorerna samt beskrivningen av markens råhet.

3.4 INFILTRATION

Infiltrationen i marken beskrivs i skyfallsmodellen för Stockholm med hjälp av en infiltrationsmodul som beräknar infiltrationen i marken baserat på ett antal parametrar. Infiltrationsmodulen beräknar hur stor del av nederbörden som infiltrerar i marken respektive rinner av på markytan. Genom att använda infiltrationsmodulen istället för att göra ett schablonavdrag direkt på nederbördsvolymen för infiltrationen i marken beroende på markanvändning erhålls en bättre beskrivning av infiltrationsförloppet eftersom infiltrationen beräknas under hela simuleringstiden. Det är dock stora osäkerheter i de infiltrationsparametrar som anges då dessa är baserade på generaliseringar.

Infiltrationsmodulen har i skyfallsmodellen för Stockholm kopplats till alla genomsläppliga ytor, dvs de ytor som kategoriserats som grönytor. I modulen beskrivs följande parametrar:

- Jordlagrets infiltrationshastighet (mm/h)
- Jordlagrets mäktighet (m)
- Jordlagrets porositet
- Jordlagrets vertikala läckagehastighet till underliggande jordarter (mm/h)
- Initialt vatteninnehåll (%)

Stockholm Vatten har valt att göra följande generaliseringar för beskrivningen av infiltrationen på grönytor:

- Alla grönytor antas ha ett lika tjockt övre jordlager som kommer att stå för majoriteten av infiltrationen vid ett skyfall, därmed sätts
 - Markens mäktighet till 0,3 m
 - Markens porositet till 40 %
- Det översta jordlagret består inom bebyggda områden ofta av någon typ av fyllnadsmaterial. Det är stora skillnader i hur det översta jordlagret är påverkad av kompaktering samt hur påverkat det är av underliggande jordarter vilket medför att det är stora skillnader i infiltrationshastighet. Valet av infiltrationshastighet har gjorts baserat på den kalibrering som DHI utförde för skyfallet i Malmö 2014 samt på de värden som återfunnits i litteratur. Infiltrationshastigheten har satts till 36 mm/h för samtliga grönytor. Eftersom det är så stora osäkerheter i infiltrationshastigheten har ingen uppdelning av grönytorerna baserat på ex kompakteringsgrad gjorts.
- Läckagehastigheten i jordlagret beror av kapaciteten djupare ner i jordprofilen vilket medför att jordarterna som anges i jordartskartan kan användas. Jordarterna har delats upp i kategorierna:
 - Grus, sand och åsmaterial
 - Morän och växtlagring
 - Organsik jord

- Silt och lera
- Berg i dagen
- Det initiala vatteninnehållet i jordlagret speglar både den hydrologiska situationen, dvs en torr sommardag, och hur mycket jordlagret fyllts upp under förregnet (totalt 25 mm regn).

I Tabell 1 sammanställs de värden som har angetts i infiltrationsmodulen baserat på markanvändning.

Tabell 1 Parametervärden ansatta i infiltrationsmodulen uppdelat i markanvändning samt underliggande jordart.

	Grönytor	Vatten	Hårdgjorda ytor		
Infiltrationshastighet (mm/h)	36	0	0		
Porositet (%)	40	0	0		
Mäktighet (m)	0,3	0	0		
	Grus, sand, åsmaterial	Morän och växtlagring	Organisk jord	Silt och lera	Berg i dagen
Läckagehastighet (mm/h)	360	36	3,6	0,36	0
Initialt vatteninnehåll, solig dag (%)	20	30	40	45	30
Initialt vatteninnehåll korrigerat för förregn (%)	41	51	61	66	50

I skyfallsmodellen för Stockholm stad används markanvändningsrastret (hårdgöringsrastret) för beskrivning av infiltrationshastigheten. För beskrivning av för jordlagrets vertikala läckagehastighet och initiala vatteninnehåll har byggnadsgeologikartan som erhållits från Stockholm stad använts inom staden och för områden utanför staden har jordartskartan som erhållits från SGU använts. Klassningen av jordartskartan i de kategorier som används i skyfallsmodellen har gjorts i enlighet med Tabell 2.

Tabell 2 Klassning av kategorier från jordartskartan för läckagehastighet och initialt vatteninnehåll.

Kategori i jordartskarta	Klassning för läckagehastighet och initialt vatteninnehåll för skyfallsmodellering
Fyllning	Morän/ Växellagring
Glacial lera	Silt/Lera
Gyttja	Organisk Jord
Gyttjelera	Organisk Jord
Isälvsediment	Grus/Sand/Åsmaterial
Isälvsediment grus	Grus/Sand/Åsmaterial
Isälvsediment sand	Grus/Sand/Åsmaterial
Klapper	Grus/Sand/Åsmaterial
Kärrtorv	Organisk Jord
Mosstorv	Organisk Jord
Oklassat område tidvis under vatten	Vatten
Postglacial finsand	Grus/Sand/Åsmaterial
Postglacial lera	Silt/Lera

Postglacial sand	Grus/Sand/Åsmaterial
Postglacial silt	Silt/Lera
Sandig morän	Morän/ Väcklagring
Svallsediment, grus	Grus/Sand/Åsmaterial
Svämsediment, grovsilt-finsand	Silt/Lera
Svämsediment, ler-silt	Silt/Lera
Torv	Organisk Jord
Urberg	Berg i dagen
Vatten	Vatten

3.5 MARKENS RÅHET

Markens råhet eller skrovlighet beskrivs i skyfallsmodellen med hjälp av Mannings tal. Markens råhet styr vattnets hastighet och påverkar därmed översvämningsförloppet. Generellt kan det sägas att hårdgjorda ytor har ett högt Mannings tal eftersom vattnet rinner snabbt på ytan. Mer genomsläppliga och skrovliga material, exempelvis grönytor och skog, har ett lägre Mannings tal vilket betyder att vattnet rinner långsammare. Markens råhet har dels differentierats efter hårdgöringsgrad och dels för att stabilisera modellen. För att minska risken för instabiliteter i modellen har områden med en lutning på över 45 grader sorterats ut och getts ett lågt värde på Mannings tal då ett högt värde på Mannings tal ger höga vattenhastigheter. Av denna anledning har även taken på byggnader i modellen har givits ett lågt värde på Mannings tal. Att korrigera Mannings tal för tak och ytor mer en lutning på över 45 grader bedöms inte påverka översvämningsförloppet nämnvärt då vattnet oavsett kommer rinna av taken samt rinna längs ytorna med kraftig lutning. Konsekvensen av att minska Mannings tal ger ett lokalt ökat vattendjup, men försumbar effekt på beräknad flödestransport. Dessa förändringar är i områden med mycket höga vattenhastigheter och har därmed inte ha någon praktisk betydelse eftersom vattendjupen oavsett kommer vara mycket små.

I skyfallsmodellen har markanvändningen för markens råhet differentierats efter hårdgöringsrastret/markanvändningsrastret. För de värden som angetts för respektive markanvändning och hur Mannings tal har satts för att stabilisera modellen sammanställs i Tabell 3.

Tabell 3 Mannings tal uppdelat fördelat på markanvändning samt värden för att stabilisera modellen.

Markanvändning	Mannings tal
Marklutning över 45 grader	2
Tak	10
Vägar	70
Grönytor	5
Vatten	15

3.6 KALIBRERING

Skyfallsmodellen för Stockholm stad har inte kalibrerats eftersom kalibreringsdata saknas. Extrema väderhändelser som skyfall uppträder mycket sällan och ofta saknas observationer och mätningar från de regnevent som faktiskt har förekommit.

Med detta följer att modellens trovärdighet baseras på att de processer som styr avrinningsförloppet på markytan vid ett skyfall är inkluderade i modellen. De största osäkerheterna i skyfallsmodelleringar är ansatt infiltrationskapacitet och ledningsnätets kapacitet.

3.7 FÖRENKLINGAR OCH GENERALISERINGAR I MODELLEN

Nedan sammanställs de viktigaste förenklingar och generaliseringar som har gjorts för skyfallsmodellen för Stockholm stad.

- Terrängmodellens storlek – gridstorleken i terrängmodellen är satt till 4 × 4 m för att ej få orimligt långa beräkningstider. Upplösningen är för grov för att fånga mindre detaljer såsom trottoarkanter, refuger och mindre höjdryggar som kan tänkas påverka avrinningen.
- Terrängmodellen representeras av en sammanhängande yta – Höjdmodellen kan bara beskrivas på en nivå som en sammanhängande yta. Med det följer att avrinningen på broar (eftersom brobanan har sorterats bort) och ner in i tunnlar (och andra underjordiska utrymmen) inte kan beskrivas på ett verkligt sätt.
- Markens infiltrationskapacitet – det är stora osäkerheter i markens infiltrationskapacitet vid skyfall, ansatta värden baseras på generaliseringar.
- Ledningsnätets kapacitet - har beskrivits som ett schablonavdrag för alla hårdgjorda ytor. I verkligheten kan ledningsnätet både ha lägre eller högre kapacitet dessutom kan ledningsnätet vara igensatt vid dessa extrema situationer.

4 RESULTAT

Resultaten från skyfallsmodellen redovisas som GIS-skikt. För de två beräkningsscenarierna har följande GIS-skikt tagits fram:

- Maximala vattendjup
- Maximalt flöde
- Vattendjup vid simuleringsslut

Med maximalt vattendjup respektive maximalt flöde menas maximalt vattendjup/flöde för varje beräkningsruta över hela beräkningen, det finns alltså ingen tid kopplad till maximalt vattendjup. Resultaten av beräkningarna har satts ihop till sammanhängande resultatfiler (som GIS-skikt) för hela Stockholm stad. Eventuella felaktiga randeffekter har klippts bort.

Utöver detta har resultats från simuleringarna sparats i dfs-2 format. Dessa kan transformeras till ascii-filer och sättas samman för vidare analys.

Följande resultat har sparats varannan minut under simuleringstiden:

- Vattendjup
- Vattenhastigheter i två riktningar
- Vattenhastighet
- Hastighetsriktning
- Vattennivå
- Frodes tal
- Vattenmättnad i marken
- Infiltrerad volym

Dessutom finns följande resultat:

- Tid för maximalt vattendjup
- Tid för maximalt flöde
- Maximal vattenhastighet
- Hastighetsriktning vid maximal vattenhastighet
- Tid för maximal vattenhastighet

- Tid med ett vattendjup över 0,3 m

Utöver detta finns också en dfs-2 fil som visar var i modellen det har skapats vatten till följd av instabiliteter i modellen samt hur mycket vatten som har skapats. Instabiliteter uppstår då beräkningscellerna blir torra vilket programmet korrigerar med att skapa en liten volym vatten för att inte skapa en blow up (dvs beräkningen stoppas). En osäkerhet i resultaten är att det genereras vatten på grund av dessa instabiliteter och att volymen vatten i modellen då är större än nederbördsvolymen. WSP har testat sig fram för att minska de volymer vatten som skapas och problemen uppstår främst på grönytor. Eftersom problemen är störst på grönytor där det sker en infiltration så kommer en del av detta vatten att infiltrerar och eftersom osäkerheterna för grönytorerna är stora pga ansatta infiltrationshastigheter bedöms resultaten ändå vara tillförlitliga.

Dessutom har fem punktresultat (en per underliggande jordart) sparats per beräkningsområde i enskilda punkter med information bland annat kring hur vattenmättnaden i marken och den infiltrerade volymen varierar under simuleringstiden.

Som komplement till resultaten har även ett jämförelseskikt tagits fram för beräknade maximala vattennivåer mellan från resultaten av maximala vattendjup för scenario C från skyfallsmodelleringen 2015.

4.1 TOLKNING AV RESULTAT

Materialet som har tagits fram är avsett för att användas som planeringsunderlag och man bör inte i detalj studera beräknade vattennivåer och dra för långtgående slutsatser. Tolkningen av resultaten bör göras mot de förenklings och generaliseringar som ligger till grund för resultaten.

Det är också viktigt att poängtera att resultaten från skyfallsmodelleringen bara redovisar marköversvämningar till följd av skyfall och inte de översvämningar som sannolikt skulle uppkomma i källare och liknande utrymmen till följd av överbelastade avloppssystem. Resultaten redovisar inte heller översvämningar till följd av höga vattennivåer i vattendrag, grundvattennivåer eller havsvattenstånd.

4.2 ANVÄNDNING AV RESULTAT

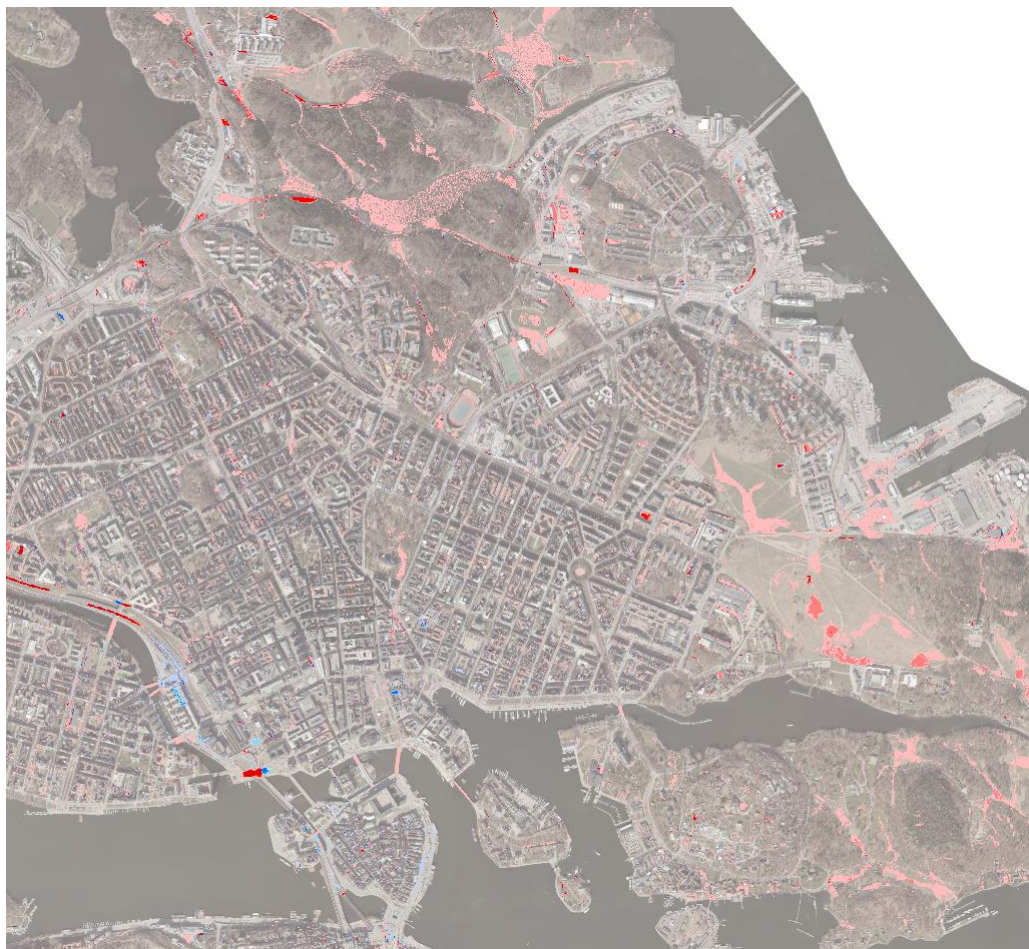
Resultaten av skyfallsmodelleringen kan användas för prioritering av områden för mer detaljerade studier där konsekvenserna bedöms vara stora och det finns behov för framtagande av åtgärdsförslag i form av lämpliga modifieringar i terrängen, såsom placering av fördröjningsmagasin, skyddsvallar och alternativa ytliga avledningsvägar.

Dessutom kan resultaten användas för bedömning av ett skyfalls påverkan på ex samhällsviktig verksamhet, för beredskapsplaner och som underlag för riskanalyser, i vilka beräkning av skadekostnader för exempelvis samhällsviktiga objekt kan ingå. Resultaten kan vidare användas för att prioritera åtgärder i Stockholm stad och väga nyttan av olika åtgärdsalternativ mot investerings och driftkostnaden.

4.3 JÄMFÖRELSE AV RESULTAT FRÅN SKYFALLSMODELLERING 2015

En översiktlig jämförelse har utförts för resultatet av 100-årsscenarioet med ett CDS-regn med scenario C från skyfallsmodelleringen från 2015 för maximala vattennivåer. Generellt ses en samstämmighet i resultaten. I stort fås att samma ytor översvämmas men generellt blir det lite högre maximala vattendjup och större utbredning med CDS-regnet än för scenario C. Framförallt är det skillnader i områden med mycket grönytor. I de centrala delarna av Stockholm med större andel hårdgjorda ytor är skillnaderna mindre, där är andelen celler med beräknade vattendjup om är större i scenario C

ungefär lika med andelen celler som är större med ett CDS-regn. I Figur 4 redovisas ett jämförelseskikt mellan scenario C och CDS-regnet med 100-års återkomsttid.



Figur 4 Jämförelseskikt, röd färg markerar de celler där beräknade vattendjup blir högre med ett CDS-regn och blå färg markerar de celler där beräknade vattendjup blir större med scenario C. Endast skillnader större än 0,1 m redovisas och desto mörkare röd respektive blå färg desto större skillnad i beräknade vattendjup.

5 SLUTSATSER

Skyfallsmodelleringen har karterat ett framtida 100-årsregn och ett regn som motsvarar det regn som föll över Köpenhamn 2011. Modelleringen visar att det skulle uppstå marköversvämningar på ett flertal platser inom Stockholm stad vid ett skyfall.

Resultaten kan användas för att identifiera de områden inom Stockholm stad där det finns risk för översvämningar vid skyfall men resultaten bör inte studeras i detalj vad gäller framräknade vattendjup eller flöden.

De största osäkerheterna i skyfallsmodellen är ansatt infiltrationskapacitet för grönytor, storleken på beräkningsrutorna i terrängmodellen då trösklar mm som kan ändra vattnets avrinning inte fås med samt ledningsnätets kapacitet. Eftersom de processer som styr avrinningen är inkluderade i modellen bedöms resultaten kunna användas för identifiering av områden som är utsatta för en översvämningrisk vid skyfall.

6 FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE

Materialet som har tagits fram kan användas på många olika sätt. Inom uppdraget har beräknade maximala vattennivåer under simuleringstiden tagits fram samt beräknade vattennivåer vid simuleringsslut. Som komplement till det resultatet är det också möjligt att ta ut följande resultat från resultatfilerna som skulle kunna användas för ex dimensionering av åtgärdsförslag. Se lista över levererade resultat. Ytterligare analyser som skulle kunna genomföras med materialet och modellerna som har skapats för Stockholm stad innefattar exempelvis:

- **Matcha översvämningssområden med geografisk position för samhällsviktiga och miljöfarliga objekt för konsekvensanalyser:**
Fördjupade konsekvensanalyser kan svara på frågor som: Vilka följdproblem kan översvämning av ett samhällsviktigt objekt få? Vilka kritiska beroenden finns? Var bör åtgärder prioriteras? Kan det finnas risk för spridning av föroreningar till följd av skyfall?
- **Matcha översvämningssområden med uttryckningsvägar:**
Används för att planera beredskap då vissa vägar är avstängda pga översvämning.
- **Detaljstudier av översvämningsskänsliga områden för ex åtgärdsplanering:**
För områden med stora översvämningsskänsligheter och många potentiella skadeobjekt bör mer detaljerade studier genomföras. Exempelvis kan markavrinningsmodellen kopplas ihop med en modell för ledningsnätet för att mer noggrant få med hur mycket vatten ledningsnätet kan ta hand om. Med markavrinningsmodellen kan översvämningsskänsligheter detaljstuderas, t.ex. om det är möjligt att anlägga en vall eller leda vattnet till ytor som bättre tål att vara översvämmade.
- **Konsekvensanalys och riskbedömning:**
För att analysera om ett 100-årsregn kan leda till skador till exempel genom inflöde i byggnader och källarutrymmen eller på kritisk infrastruktur, såsom till exempel skolor måste en detaljerad riskanalys genomföras. En sådan analys skulle kräva detaljerad information om höjdsättning och bebyggelse i området för att undersöka lokala översvämningsskador.
- **Ras- och skredkarteringar, erosionsutredningar:**
Matcha översvämningssområden och vattenhastigheter med jordartskarta och förutsättningar för ras, skred och erosion.

7 REFERENSER

Boverket (2018): PBL Kunskapsbanken, Utgångspunkt för översvämningsskador, <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/detaljplan/lansstyrelsens-tillsyn/tillsynsvagledning-oversvamning/stod-till-lansstyrelsen-vid-riskbedomning/utgangspunkter-for-bedomning-oversvamningsskador/>, hämtat 2018-03-28.

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)].

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB (2017): Vägledning för skyfallskartering – Tips för genomförande och exempel på användning. Publikation MSB1121 – augusti 2017.

SMHI (2018): www.smhi.se/kunskapsbanken, hämtat 2018-01-03

Tyréns (201): PM ytkartering Huddinge.

Vejret, 128, august 2011: Tropisk styrtregn over Kobenhavn den 2 juli 2011 Alle danske monsterregns moder, Af Flemming Vejen, DMI

WSP (2016): PM Höjdmodell Stockholm och Huddinge, 2016-11-03.

VI ÄR WSP

WSP är ett av världens ledande analys- och teknikkonsultföretag. Vi verkar på våra lokala marknader med stöd av global expertis. Som tekniska experter och strategiska rådgivare har vi tillgång till ingenjörer, tekniker, naturvetare, planerare, utredare och miljöspecialister liksom professionella projektörer, konstruktörer och projektledare. Vi erbjuder hållbara lösningar inom Hus & Industri, Transport & Infrastruktur och Miljö & Energi. Med drygt 36 500 medarbetare på 500 kontor i 40 länder medverkar vi till en hållbar samhällsutveckling. I Sverige har vi omkring 3 700 medarbetare. www.wsp.com

WSP Sverige AB

121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7

T: +46 10 7225000
Org nr: 556057-4880
Styrelsens säte: Stockholm
[wsp.com](http://www.wsp.com)

