



UPPSALA  
UNIVERSITET



UPTEC W 19 009

Examensarbete 30 hp  
Februari 2019

# Avgränsningsmetodens betydelse för hydraulisk modellering av spill- och dagvattennät

The effects of delineation methods on hydraulic  
modelling of wastewater networks

---

David Johansson



# REFERAT

## Avgränsningsmetodens betydelse för hydraulisk modellering av spill- och dagvattennät

*David Johansson*

Metoden för att avgränsa modellområdet i delavrinningsområden med homogena hydrologiska parametrar inför hydrauliska ledningsnätssimuleringar kan vara tidsödande. Olika metoder och tillvägagångssätt finns att tillgå, men kunskapen om hur valet av avgränsningsmetod påverkar simuleringsresultaten är begränsad.

I examensarbetet undersöktes hur fyra enkla avgränsningsmetoder, i jämförelse med två detaljerade metoder, påverkade en hydraulisk simulering av en regnhändelse på sex olika modelluppsättningar av spill- och dagvattennät. De detaljerade metoderna byggde på information om markhöjder i kombination med byggnaders placering, medan de enklare metoderna byggde på information om markhöjder respektive Thiessenpolygoner. Avgränsningsmetoderna testades för en dagvattenmodell, en kombinerad spill- och dagvattenmodell, och fyra spillvattenmodeller. Alla modellparametrar förutom de associerade med delavrinningsområdena (bidragande yta, koncentrationstid) hölls konstanta medan en regnhändelse med återkomsttid tio år och en maximal regnintensitet av 22,8  $\mu\text{m/s}$  (82.1 mm/h) simulerades för varje avgränsningsmetod och modelluppsättning.

De olika metoderna gav upphov till skillnader i simulerat maximalt vattendjup i modelluppsättningarnas brunnar. De enklare metoderna tenderade att underskatta de simulerade vattendjupen och avvikelsen mot de detaljerade metoderna översteg 0,1 m, vilket utgjort en gräns för när avvikelsen får praktisk betydelse. Fler avvikelser erhöles uppströms i ledningsnätet och för modelluppsättningar med större avrinningsbildning. Inga entydigt upprepande förhållanden mellan metodernas påverkan på simuleringsresultaten mellan modelluppsättningarna fanns, varvid modellområdesegenskaper tros påverka effekten av vald avgränsningsmetod. Resultaten indikerade att det kan vara mer motiverat att använda enklare avgränsningsmetoder för spillvattenmodeller i förortsmiljö än för dagvattenmodeller i stadsmiljö, samt att metoder baserat på Thiessenpolygoner ger bättre överensstämmelse mot detaljerade metoder än de topografibaserade.

**Nyckelord:** avgränsningsmetod, avrinningsområde, avloppsnät, hydraulisk modellering, dagvatten, spillvatten

*Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet  
Lennart Hjelmns väg 9, Box 7050, 75007 Uppsala*

# ABSTRACT

## The effects of delineation methods on hydraulic modeling of wastewater networks

*David Johansson*

The method of delineating a model into sub-catchments with homogenous hydrological parameters, before performing hydraulic simulations, can be tedious work. Different approaches and methods for this purpose exist, but the understanding for how the choice of delineation method affects the modeling process and in the end the simulation results is limited.

This thesis explored how four simplified delineation methods, in comparison with two detailed methods, affected hydraulic simulation of a rain event on six different model set ups. The detailed methods were based on terrain analysis and property boundaries. The simplified methods were composed of two methods based on terrain analysis of elevation models, and two methods based on Thiessen polygons. The delineation methods were applied on one stormwater model, one combined storm- and wastewater model, and on four wastewater models. All model parameters except for those associated with the sub-catchments (time of concentration, imperviousness) were kept constant as a scenario of a rain event with a return time period of 10 years and maximum intensity of 22.8  $\mu\text{m/s}$  (82.1 mm/h) were simulated for every delineation method and model set up.

The different methods resulted in differences in simulated maximal water depth in the modelled manholes. The simplified methods tended to underestimate the water depth. Additionally, the deviation from the detailed methods exceeded 0.1m, which is a threshold value for when the deviations will be of practical importance. Greater deviations occurred upstream in the sewer system and for models with greater runoff volume. No unambiguous patterns were found between the methods and the model setups. Hence, the delineation methods cannot by themselves explain the observed deviation in the simulated water depths. The results indicate that it is more suitable to apply a simple method on a sewage model in a suburban area, than for a stormwater model in an urban area. In addition, the simplified methods based on Thiessen polygons showed more agreement with the detailed methods than the simple methods based on terrain analysis.

**Keywords:** Delineation method, catchment, collection system, hydraulic modeling, stormwater, wastewater

*Department of Aquatic Sciences and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences  
Lennart Hjelm's väg 9, Box 7050, SE-75007 Uppsala*

## FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utfördes som slutgiltig del av civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts på uppdrag av avdelningen för vattenutredningar på Tyréns AB i Stockholm, med handledning av Hans Hammarlund och Linnea Siegwán. Ämnesgranskare har varit Elin Widén Nilsson vid institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet. Examinator har varit Björn Claremar vid institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Ett stort tack riktas till mina handledare Hans och Linnéa på Tyréns och till min ämnesgranskare Elin för stöd, hjälp och handledning under projektets gång. Ytterligare ett tack riktas till Martin Rosén för otaliga tips och råd om programtekniska finesser, samt till alla på avdelningen vattenutredningar för att ha välkomnat mig in i gemenskapen under projektets gång. Ytterligare tack riktas till Sten Blomgren och DHI för att ha försett mig med en student-licens för MIKE URBAN, till Hampus Åkerblom för att ha gett mig tillgång till Scalgo, och till Stockholm Vatten, Sundbyberg avfall och vatten, Göteborg Stad och Tekniska verken för att ha gett mig tillgång till modelluppsättningar och nödvändig information om de ledningssystem som legat till grund för arbetet.

Slutligen, vill jag uttrycka en stor tacksamhet för alla de nära och kära som förgyllt min studietid, samt speciellt tacka Anika, Jonathan, Harald och Rudy som lyssnat till min klagosång och alltid bistått med ovärderlig uppmuntran.

Uppsala, februari 2019

*David Johansson*

## POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

I takt med att samhällen och städer växer, och klimatet förändras, ökar belastningen på det åldrande avloppssystem som ser till att transportera bort regn- och avloppsvatten. För att undvika översvämningar och för att säkerställa systemens tillräcklighet är det viktigt att kunna förutsäga hur avloppssystemen kommer att fungera i framtiden, för att rätt beslut ska kunna fattas idag. För att undersöka hur avloppssystemet påverkas vid stora regn används hydrauliska ledningsnätmodeller. I modellen byggs en förenklad bild av det verkliga avloppssystemet upp efter flertalet anpassningar och generaliseringar. I denna studie har olika metoder för att dela upp modellområdet i mindre områden med syftet att kunna beskriva hur mycket av det vatten som faller över det undersökta området som når avloppssystemet jämförts. Studien har jämfört två detaljerade metoder mot fyra enkla metoder och hur dessa påverkat modellens förmåga att beskriva regnets påverkan på avloppssystemet för det största regn som är att förvänta inom en tidsperiod av tio år.

Det regn som faller över ett område kan rinna ner i, stanna kvar på, eller rinna längs med markytan. Det vatten som rinner längs markytan, ytavrinning, är högre i tät bebyggda miljöer i jämförelse med mindre bebyggda områden. Förekomsten av vägar och byggnader påverkar hur regnvatten färdas genom det bebyggda landskapet och bildar barriärer som inte låter regnet rinna ned i marken. Istället blir regnet till avrinning, på fackspråk kallat dagvatten, som för att det inte ska riskera att skada bebyggelsen leds bort via avloppssystem. En del av det regn som tar sig ned i marken kan också rinna in till avloppssystemet via sprickor i rör, så kallat tillskottsvatten. Om avloppssystemets inte är tillräckligt stort i relation till hur kraftigt regnet är försämras systemets bortförande funktion och översvämningensrisk uppstår. Det är i modellerings syfte intressant att undersöka, för olika typer av regnhändelser, om avloppssystemet klarar av en högre belastning och vilka konsekvenserna blir om det inte gör det. Om avloppssystemet inte klarar av att föra bort vatten dämns systemet upp och vattennivåerna i ledningar och brunnar uppströms stiger. Då vattnet stiger finns risk för översvämningar som kan bli kostsamma och mycket besvärliga för privatpersoner och samhället. Genom att undersöka hur avloppssystemet reagerar på olika typer av regn med hjälp av modellering, kan rätt åtgärder tas vid utredning av avloppssystemets funktion. Då en modell består av många förenklingar av verkligheten är det viktigt att ha kunskap om hur de metoder och de val som görs inom modelleringsprocessen påverkar resultaten för att rätt slutsatser ska kunna dras.

För att kunna modellera så bra som möjligt krävs att modellområdets svar på ett regn kan beskrivas på ett så bra sätt som möjligt. Därav avgränsas modellområden till mindre delavrinningsområden som noggrannare kan beskriva hur mycket avrinning som rinner till en viss punkt på ledningssystemet. Avgränsning och framtagande av delavrinningsområden kan ske med hjälp av information om markens lutningar, information om var byggnader befinner sig, och om avloppssystemets utbredning och beståndsdelar. I examensarbetet jämfördes enklare metoder baserade på information om markens höjder respektive information om avstånd till olika delar av ledningsnätet med detaljerade metoder baserade på både information om markens höjder samt byggnaders placering. För att undersöka de olika metodernas effekt på modelleringen användes information om ledningsnätet, modellområdet och modeller från fyra svenska företag som ombesörjer avloppsneten i Stockholm, Sundbyberg, Linköping och Göteborg. Modellområdena var till största del belägen i stadsmiljö eller förortsmiljö och varierade i storlek. I modelleringsprogrammet MIKE URBAN efterliknades en regnhändelse och resulterande effekt på avloppssystemet för varje metod och modellområde. Resultaten visade indikationer på att de enklare metoderna generellt underskattar regnets påverkan på

vattennivåerna i avloppssystemet i jämförelse med de detaljerade metoderna. Skillnaderna var så stora att de får praktisk betydelse vid exempelvis identifiering av områden som riskeras att däckas. De enklare metoderna som byggde på information om markytans höjd krävde mer tid och stämde sämre överens med de detaljerade metoderna jämfört med de enklare metoder som byggde på avstånd till olika delar av avloppssystemet. För modellområden som skapar förhållandevis mycket avrinning till ledningssystemet har metoderna visat på större skillnader jämfört med områden som inte genererat så mycket avrinning. En större skillnad syntes även för områden i början av avloppssystemet i jämförelse med områden längre nedströms. Då modelleringar används vid exempelvis riskanalyser är det mer önskvärt att överskatta regnets påverkan på systemet än att underskatta det. Därför har resultaten visat att det kan vara mer motiverat att använda förenklade modeller på spillvattennät i glest bebyggda miljöer, men att en mer detaljerad avgränsningsmetod är att föredra för dagvatten i tät bebyggda områden. Resultaten för de olika metoderna har inte förhållit sig på ett likartat sätt mellan de olika modellområdena och därför tros modellområdets egenskaper (typ av bebyggelse, kuperat/flackt modellområde, lutning) ha betydelse för hur stort inflytande valet av metod haft för resultaten. Då modeller och modellresultat tolkas och används av fler än endast modellaren själv är det viktigt att redovisa valet av avgränsningsmetod och dess tillkortakommanden så att rätt slutsatser kan dras från resultaten av fler än endast den som arbetat med modellen. Det blir även viktigt att sätta valet av avgränsningsmetod i relation till andra modellparametrar och deras påverkan på resultaten.

## ORDLISTA

<b>Andel bidragande yta</b>	Andel yta av delavrinningsområdet som genererar avrinning till ledningssystemet baserat på markanvändning, modelluppsättning och ledningssystem.
<b>Avgränsningsmetod</b>	Metodik för att dela upp modellområdet i delavrinningsområden kopplade till punkter på ledningsnätet.
<b>Avrinningskoefficient (<math>\varphi</math>)</b>	Anger hur stor del av en viss typ av markanvändning, från 0 till 1, som bidrar till ytavrinningen. Värdet 1 indikerar att hela ytan bidrar.
<b>Dagvatten</b>	Vatten som vid regn avrinner från hårdgjorda ytor som asfalterad mark, hustak m.m.
<b>Delavrinningsområde</b>	En avgränsad yta som genererar avrinning till ett valt objekt (i denna studie en nod/brunn) inom modelluppsättningen.
<b>Delvis kombinerat system</b>	Ett ledningssystem där dagvatten och spillvatten från fastigheter avleds i samma ledning, men dagvatten från vägar avleds i egen ledning.
<b>Design-regn</b>	Ett fiktivt regn bestående av konstant eller varierande regnintensitet över en bestämd tidsrymd.
<b>Kombinerat system</b>	Ett ledningssystem där dagvatten och spillvatten avleds i samma ledning.
<b>Koncentrationstid</b>	Den tid det tar för vatten att rinna från änden av delavrinningsområdet till utloppet.
<b>Ledningshjäss</b>	Vattenledningens ”tak”. När ledningen går full når vattnet upp till ledningshjässan.
<b>Ledningsnät</b>	Spill- och/eller dagvattenledningar (inom denna studie).
<b>Modellområde</b>	Det geografiska området motsvarande ledningsnätet och tillhörande avrinningsområde.
<b>Modelluppsättning</b>	En modell anpassad efter ett geografiskt område av intresse.
<b>MVP</b>	Meter vattenpelare.
<b>Nedstigningsbrunn</b>	En brunnsöppning för underhåll och inspektion av ledningssystemet och kopplingar.



<b>Regnets återkomsttid</b>	Indikerar det genomsnittliga största regn som kan förväntas inträffa en gång under tidsperioden, baserat på historiska mätserier.
<b>Rännstensbrunn</b>	En brunnsöppning på markytan som leder dagvatten ner till avloppssystemet.
<b>Separerat system</b>	Ett ledningssystem där dagvatten och spillvatten avleds i separata ledningar.
<b>Servis</b>	Påkoppling till ledningsnätet från en fastighet.
<b>Spillvatten</b>	Förorenat avloppsvatten som avleds till ledningssystemet från en fastighet.

# Innehållsförteckning

1. INLEDNING .....	1
1.1 SYFTE OCH MÅL .....	2
1.2 AVGRÄNSNINGAR .....	2
2. TEORI .....	3
2.1 DET URBANA AVRINNINGSOMRÅDET .....	3
2.2 LEDNINGSNÄT .....	4
2.3 AVGRÄNSNINGSMETODER .....	5
3. HYDRAULISK MODELLERING AV LEDNINGSNÄT .....	9
3.1 MODELLUPPSÄTTNING .....	9
3.2 AVRINNINGSMODELLERING .....	10
3.3 LEDNINGSNÄTSMODELLERING .....	12
4. MATERIAL OCH METOD .....	15
4.1 OMRÅDESBESKRIVNINGAR .....	15
4.2 DATAHANTERING .....	16
4.3 AVGRÄNSNINGSMETODER .....	16
4.3.1 Metod I: Höjddata, rännstensbrunnar, ledningar & fastighetsgränser .....	16
4.3.2 Metod II: Höjddata, nedstigningsbrunnar, ledningar och fastighetsgränser .....	18
4.3.3 Metod III: Topografisk höjdanalys med DEM och ledningssystem .....	19
4.3.4 Metod IV: Topografisk höjdanalys med DEM och byggnader .....	20
4.3.5 Metod V: Thiessenpolygoner baserat på nedstigningsbrunnar .....	20
4.3.6 Metod VI: Thiessenpolygoner baserat på ledningar .....	22
4.3.7 Manuell korrigering .....	22
4.4 AVRINNING- OCH LEDNINGSNÄTSSIMULERING .....	22
4.4.1 Bidragande yta .....	23
4.4.2 Koncentrationstid .....	25
4.4.3 Simulering .....	25
4.4.4 Resultatjämförelse .....	26
5. RESULTAT .....	28
5.1 DELAVRINNINGSOMRÅDEN .....	28
5.2 SIMULERAT MAXIMALT VATTENDJUP .....	30
5.3 FÖRENKLAD KOSTNAD-NYTТА-ANALYS .....	38
6. DISKUSSION .....	39
6.1 DELAVRINNINGSOMRÅDEN .....	39
6.2 SIMULERAT MAXIMALT VATTENDJUP .....	39
6.3 FÖRENKLAD KOSTNAD-NYTТА-ANALYS .....	40
6.4 OSÄKERHETER .....	41
6.5 PRAKTISKA IMPLIKATIONER OCH FRAMTIDA STUDIER .....	41
7. SLUTSATSER .....	43
REFERENSER .....	44
BILAGOR .....	47
BILAGA A: DATA .....	47
BILAGA B: VERKTYG FÖR BEHANDLING I ARCGIS .....	48
BILAGA C: DELAVRINNINGSOMRÅDEN .....	49
BILAGA D: MARKANVÄNDNING .....	52
BILAGA E: ANDEL BIDRAGANDE YTA .....	55

# 1. INLEDNING

Det avloppsnät som finns i den bebyggda miljön har funnits och byggts ut under en lång tid, vilket har gett upphov till ett system av varierande slag och ålder. I takt med förtätning av bebyggda områden och rådande klimatförändring, som innebär ökad belastning på ledningssystemen, efterfrågas större kunskap om den urbana hydrologin och om hur modeller kan användas för att undersöka avloppssystemets funktion (Fletcher m.fl., 2013). Idag vid framtagande, utbyggnad och underhåll av ledningsnät för spill- och dagvatten används hydrauliska ledningsnätmodeller för att ge kunskap om avloppssystemets tillräcklighet. I Sverige finns rekommendationer för hur modelluppsättningar och utredningar bör genomföras, men det finns en bristande kunskap om antagandens och parametrars inverkan på simuleringsresultat (Svenskt Vatten, 2018).

En viktig del i framtagandet av hydrauliska modelluppsättningar är den fysiska avgränsningen av ledningsnätets delavrinningsområden, med andra ord, metoden för att dela upp modellområdet i mindre områden inom vilka modellparametrar approximeras till att vara homogena. Att ta fram en yttersta hydrologisk vattendelare för det totala område som bidrar till avrinning till ledningsnätet görs ofta inte vid modellering av urbana områden då vatten i ledningssystemet ofta trotsar topografiska markegenskaper via exempelvis pumpar och kulvertar. Syftet med modelleringen kan vara att utreda avrinningen från ett förbestämt område och därmed blir den yttersta vattendelaren i modellen densamma som modellområdesgränsen. Att avgränsa delavrinningsområden manuellt efter information från exempelvis flygfoton/laserdata och lednings- och fastighetskartor kan vara mycket tidsödande då en modelluppsättning kan bestå av hundratals eller upp till tusentals delavrinningsområden. I modelleringsprogram finns automatiska tidsbesparande metoder för att dela upp modellområdet i mindre delavrinningsområden som i allmänhet bygger på lutningsförhållanden eller närmsta avstånd till ledningsnätets komponenter. Vissa av dessa automatiska rutiner ger bra resultat för relativt obebyggda områden, men kan ge upphov till fel när ledningsnät i urban miljö behandlas (Chen m.fl., 2011). Ytterligare en svårighet är att bebyggda områden ofta är flacka vilket kan minska säkerheten hos de automatiska metoderna (Callow m.fl., 2007). Automatiserade avgränsningsmetoder har uppvisat skillnader upp till 25 % mot hybridmetoder, där delsteg utförts manuellt (Jankowsky m.fl., 2013). Med ovanstående i åtanke är det av intresse att undersöka hur olika metodval för avgränsning av modellområdet skiljer sig ifrån varandra. Det är även av intresse att utvärdera hur mycket modellresultaten skiljer sig från metod till metod i relation till mängden arbete/tid som lagts ner på att ta fram avrinningsområdet.

Vid framtagandet av en modelluppsättning över ett ledningsnät behöver den komplexa urbana hydrologin representeras på ett förenklat sätt. Då kunskapen om alla hydrologiska och hydrauliska processer i systemet är långt ifrån fullständig, är det omöjligt att verifiera modelluppsättningens riktighet. Detta är ett vanligt förekommande problem vid modellering då majoriteten av systemen under analys är så kallade öppna system varvid modeller aldrig kan antas vara felfria, oberoende av mängden indata (Oreskes m.fl., 1994). Detta examensarbete har undersökt variationen i simuleringsresultat för olika avgränsningsmetoder för att ge en ökad förståelse för styrkor och svagheter hos dessa, men gör inte anspråk på att ha identifierat vilken metod som bäst beskriver den fysikaliska verkligheten.

## 1.1 SYFTE OCH MÅL

Examensarbetets syfte är att undersöka hur stor betydelse metoden för att avgränsa delavrinningsområden har för hela modelleringsförloppet vid utredning av avloppsnätets funktion. Resultatet av examensarbetet ämnas sättas i relation till andra metodval inom modelleringsprocessen för att synliggöra vilka faktorer som är viktiga att dokumentera i samband med hydraulisk modellering av spill- och dagvattennät.

Målet med examensarbetet är att genom en jämförelse mellan olika avgränsningsmetoder urskilja likheter och olikheter i det slutliga simuleringsresultatet av ledningsnätets respons på en utvald regnhändelse. Att kunna likställa påverkan från olika metoder kan underlätta simuleringsarbetet då en snabbare eller enklare metod kan väljas framför en mer arbetskrävande, samt motivera att andra modellparametrar/metodval är av större betydelse för modelleringsprocessen. Målet är därmed att kunna ge indikationer och råd om vilka metoder som är att föredra framför andra, för att underlätta arbetet med utredningar av avloppssystemet.

Examensarbetets mål preciseras genom följande frågeställningar:

- Vilka metoder kan användas för att fysiskt avgränsa delavrinningsområden och vad skiljer dem åt?
- Hur påverkar metodvalet simuleringsresultaten?
- Hur skiljer sig simuleringsresultaten för respektive metod mot varandra?
- Hur tidskrävande är respektive metod?

## 1.2 AVGRÄNSNINGAR

Examensarbetet har avgränsats till att behandla sex modelluppsättningar och sex avgränsningsmetoder för att rymmas inom tidsramen för ett examensarbete på 30 högskolepoäng om 20 veckor. Vid hydraulisk modellering av ledningsnät i Sverige används främst programvaran *MIKE URBAN* utgiven av DHI (Blomqvist *m.fl.*, 2016). Hydraulisk modellering kan utföras i flertalet program, men då denna studie är inriktad mot svensk praxis har programmet *MIKE URBAN* valts för modelleringen.

## 2. TEORI

### 2.1 DET URBANA AVRINNINGSSOMRÅDET

Avrinningsområdet är det område som uppströms en utvald punkt bidrar till vattenflödet till och genom den valda punkten (Grip & Rodhe, 2016). Avrinningsområdet avgränsas mot andra avrinningsområden med en vattendelare. Regn som faller över avrinningsområdet kan antingen lagras i marken, avdunsta, eller avrinna ovanpå markytan alternativt genom markprofilen i enlighet med vattenbalans ekvationen (ekvation 1; Grip & Rodhe, 2016).

$$R = P - E - \Delta S \quad (1)$$

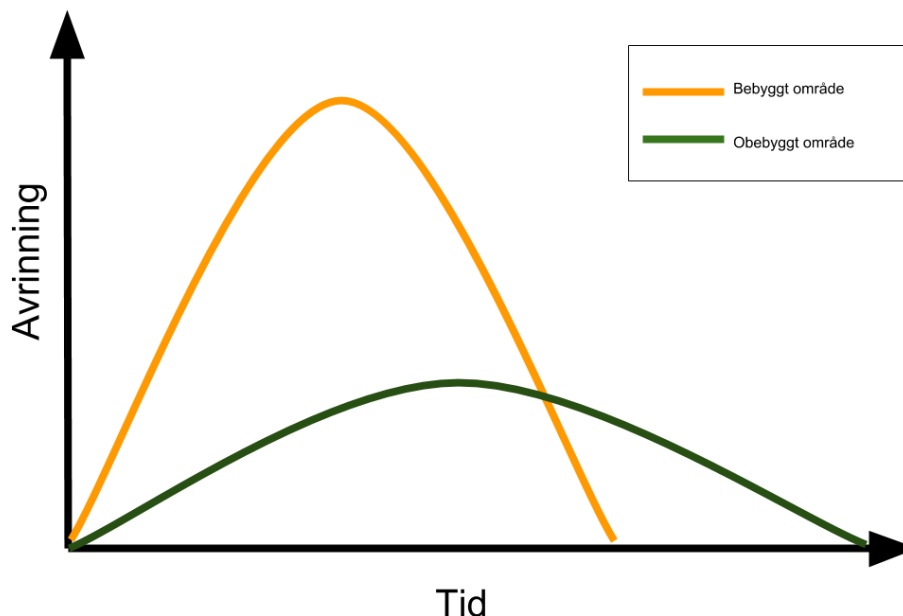
$$R = \text{Avrinning} \left[ \frac{m^3}{s \cdot m^2} \right]$$

$$P = \text{Nederbörd} \left[ \frac{m^3}{s \cdot m^2} \right]$$

$$E = \text{Avdunstning} \left[ \frac{m^3}{s \cdot m^2} \right]$$

$$\Delta S = \text{magasinering i marken} \left[ \frac{m^3}{s \cdot m^2} \right]$$

Avrinningsområden kan indelas i mindre områden, delavrinningsområden, med syfte att beskriva olika egenskaper hos olika delar av avrinningsområdet. Avrinningsområdet i urban miljö skiljer sig från sin naturliga motsvarighet där avrinningen främst förflyttas nedströms i topografin via vattendrag. Förekomsten av byggnader och vägar i den urbana miljön ökar andelen hårdgjorda ytor, det vill säga de ytor (ex. asfalt och tak) som förhindrar regnvatten att infiltrera ned i marken, och förändrar hydrologiska processer (Goonetilleke m.fl., 2015). Dessa antropogena förändringar ökar hastigheten hos avrinningen och den avrunna volymen (Goonetilleke m.fl., 2015), vilket gör att hydrografen för ett urbant avrinningsområde visar på större volym avrinning och högre samt snabbare respons på regnhändelser än det hade innan bebyggelse påbörjades (Figur 1).



**Figur 1** Teoretisk hydrograf över en och samma regnhändelse på bebyggt och obebyggt mark. I ett bebyggt avrinningsområde erhålls en större volym avrinning (arean under linjerna motsvarar ackumulerad avrinning) och en snabbare respons på regntillfället.

Till skillnad från det naturliga avrinningsområdet domineras det urbana av snabb ytavrinning, avrinning i ledningar och av jämförelsevis låg infiltration. Detta i kombination med ett ofta flackt landskap gör att en modellbeskrivning av den urbana hydrologin skiljer sig mot modellbeskrivning av hydrologin i naturmark. Förutom att ta hänsyn till hur regn bildar olika mycket ytavrinning på olika typer av marktyper, måste hänsyn tas till ledningsnätets avledande funktion.

## 2.2 LEDNINGSNÄT

Ledningsnätet i denna rapport avser det system som avleder avloppsvatten från byggnader och öppen mark via eventuella reningsanordningar till reningsverk och recipient. Själva ledningarna varierar i dimension, material, ålder, och i vilken typ av vatten de primärt avleder.

Fyra olika typer av avloppsvatten är viktiga att ta hänsyn till vid modellering av avloppsnätet: spillvatten, dagvatten, dräneringsvatten och tillskottsvatten. Dessa typer definieras enligt följande:

- Spillvatten är det vatten som avleds från hushåll och industrier, och är i regel det mest förorenade vattnet av de fyra typer som tagits upp (Nationalencyklopedin, 2018b).
- Dagvatten avser regn och smältvatten som avrinner från tak, vägar och grönytor (Nationalencyklopedin, 2018a).
- Dräneringsvatten är vatten som avleds från husgrunder (Svenskt Vatten, 2016).
- Tillskottsvatten är det vatten förutom spillvatten som avleds i den spillvattenförande ledningen, exempelvis vatten från inläckage eller felaktigt påkopplat dagvatten (Svenskt Vatten, 2016).

Under första halvan av 1900-talet användes ett kombinerat ledningssystem där spillvatten, dagvatten och dräneringsvatten avleddes genom en och samma ledning. I och med en större medvetenhet om krav på rening och en större belastning på grund av ökad befolkningstäthet har det kombinerade systemets ersatts av ett separerat system där dagvatten och dräneringsvatten avleds i egen ledning (Svenskt Vatten, 2016). Både kombinerade och separata system förekommer i Sverige, men det kombinerade systemet utgör endast 13 % av det befintliga avloppsnätet (Svenskt Vatten, 2016). Ytterligare en typ av ledningssystem förekommer, ett så kallat delvis kombinerat system. I detta fall avleds dag- och spillvatten från fastigheter i samma ledning, men dagvatten från vägar har försetts med en egen separat ledning.

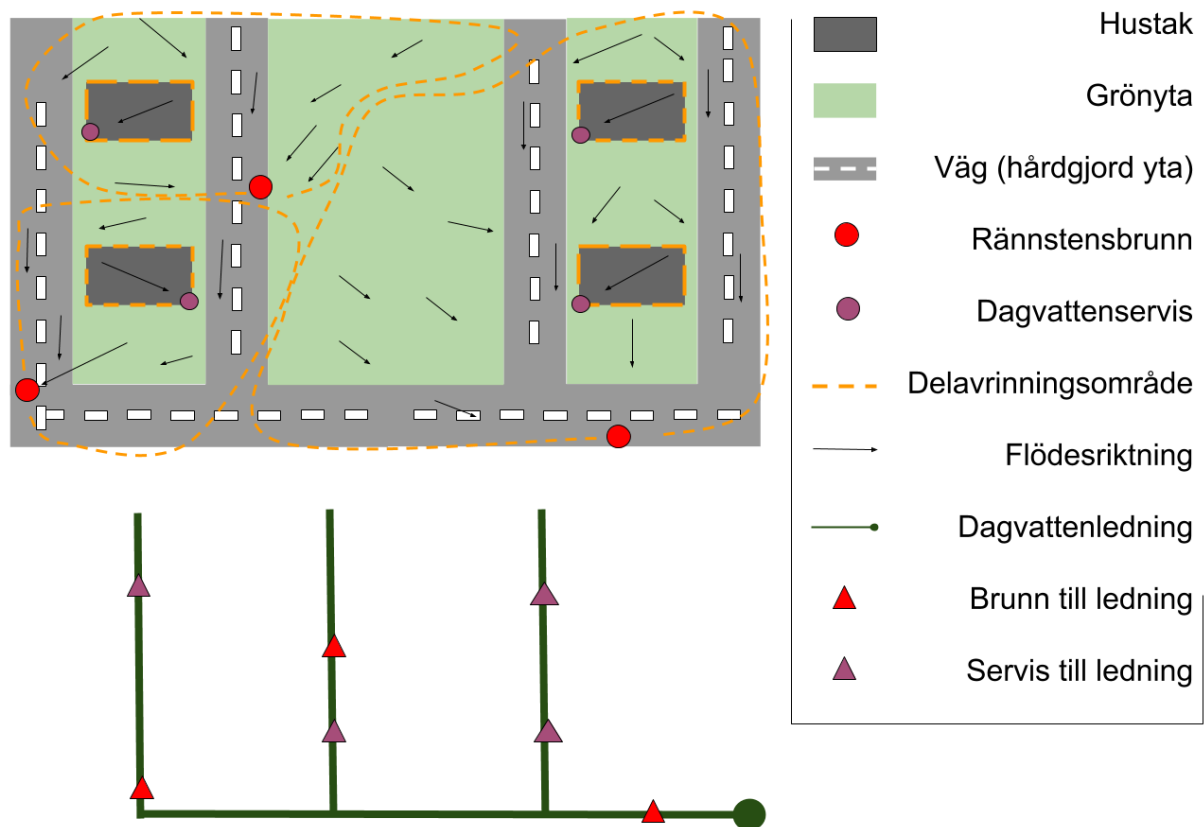
Flödet i ledningarna kan härledas till hushållens vattenförbrukning och dess variation under dygnet och mellan säsongerna, men påverkas även av vädret. Regnhändelser bidrar till ett ökat flöde i ledningarna då avrinning från tak och marktyper adderas till hushållens vattenförbrukning i kombinerade system. I separerade system belastar regnet dagvattenledningarna till största del, men även spillvattenledningarna belastas av tillskottsvatten och av eventuellt felkopplade dagvattenförande ledningar som sammanlänkar fastigheter med ledningssystemet (serviser). Vid kraftigare regn som inte ledningsnätets dimension klarar av att svälja, finns ofta en bräddande funktion. Vid bräddning leds vattnet, som kan vara både dag- och spillvatten, ut direkt till recipient. Om en bräddningsfunktion saknas eller inte kan svälja volymen vatten däms ledningssystemet uppströms vilket leder till problematiska konsekvenser som källaröversvämningar eller översvämning av markytan. För att minimera risken för översvämningar dimensioneras ledningsnätet för en större volym än vad som kan förväntas av mer frekvent förekommande regn.

Ledningsnätets respons på en vald regnhändelse kan simuleras i en hydraulisk modell förutsatt att avrinningen från modellområdet till ledningsnätet kan uppskattas. Att hela modellområdet skulle generera lika mycket avrinning är en för grov tilltagen approximation, istället delas modellområdet upp i mindre områden. Med hjälp av information om markanvändningen inom dessa mindre delavrinningsområden kan en mer högupplöst beskrivning av avrinningens variation inom modellområdet tas fram.

## **2.3 AVGRÄNSNINGSMETODER**

För att i modellerings syfte kunna förutsäga mängden avrinning som uppkommer vid regn avgränsas modellområdet till mindre områden, delavrinningsområden, där modellparametrar beskrivandes avrinningsbildningen antas vara homogena. Dessa delavrinningsområden kommer vid simulering av ledningsnätets respons på ett regn vara avgörande för hur mycket simulerat vatten som rinner in i på olika platser på ledningsnätet.

För att avgränsa ett avrinningsområde till ledningsnätet och erhålla delavrinningsområden måste vattnets väg från regn till ledningsnätet uppskattas (Figur 2). För enskilda hus kan regnvattnet komma in till ledningsnätet via en direkt anslutning (serviser), eller via läckage till ledningar (Svenskt Vatten, 2016). Modelleras ett dagvattennät eller ett kombinerat nät, kommer regnvatten från byggnadstak att vara kopplade via stuprör och serviser till ledningssystemet, men modelleras ett spillvattennät i ett separerat system består inkommande regnvatten av tillskottsvatten. Regnvatten från öppna ytor som vägar och grönytor rinner längs markytan till befintligt ledningsnät via rännstensbrunnar för dagvatten/kombinerade nät. För spillvattennät inkommer regnvatten från markytor som tillskottsvatten.



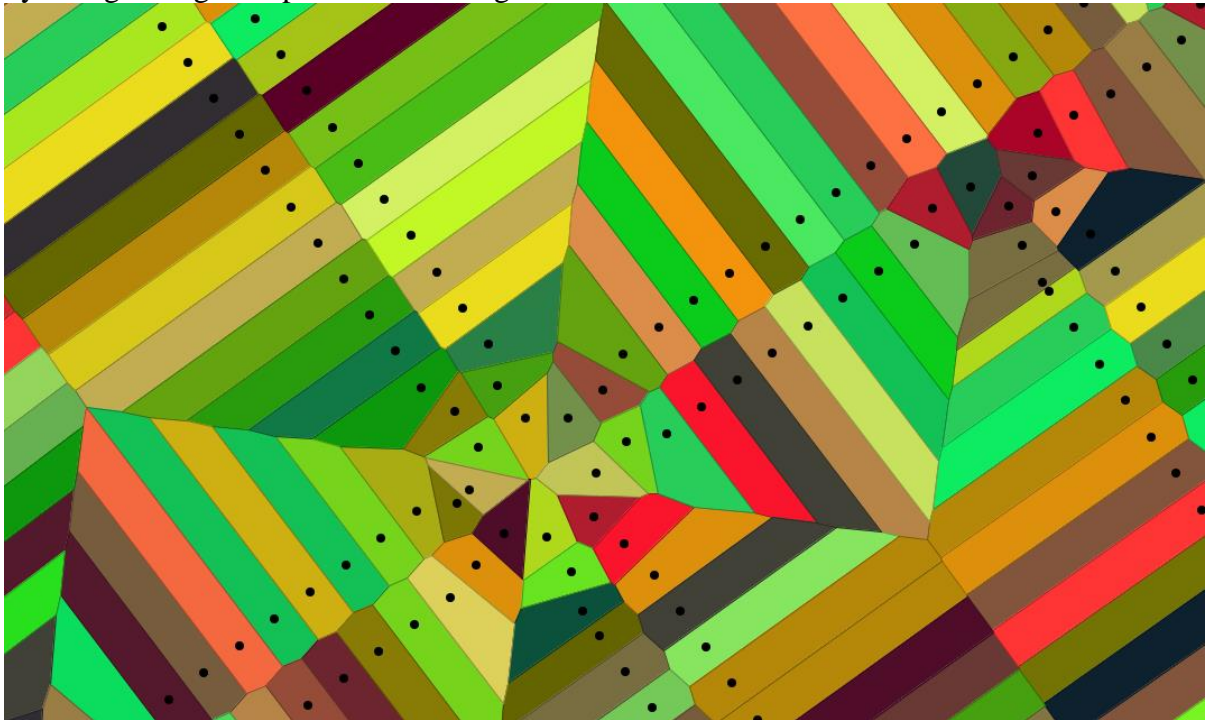
**Figur 2** Delavrinningsområden (inom streckade gula linjer) i ett bebyggt område med ett separerat ledningssystem. I den övre bilden ses hustak (mörkgrå), serviser (lila symboler), grönytor (ljusgrön), gatuytor (ljusgrå med vita streck) och brunnar (röda symboler) som leder yt-avrinning till dagvattenledning under mark. I den undre delen av bilden ses det mottagande ledningsnätet (mörkgröna linjer) med anslutningar (trianglar) från brunnar och serviser.

Två olika alternativ för att avgränsa avrinningsområdet har undersökts i detta arbete, dels topografibaserade metoder och dels avståndsbaserade metoder. De två olika typerna av avgränsning kan implementeras antingen som helt skilda metoder, eller som en kombinerad hybridvariant. De topografibaserade metoderna bygger på analyser av markytans höjd och förväntade flödesvägar längs denna. Med andra ord, analyseras lutningsförhållanden längs markytan och därefter vattnets flödesväg. För denna metod är tillgång till information om markhöjder och lutningsförhållanden för att kunna beskriva småskaliga förändringar i landskapet av stor betydelse (Vaze m.fl., 2010; Jankowfsky m.fl., 2013). Dessa data finns att tillgå i olika upplösningar och format, men det är inte givet att en högre upplösningsgrad på topografiska data ger bättre resultat, då upplösningen bör motsvara skalan av förändring i landskapet/stadsmiljön (Yang m.fl., 2014; Zhang & Montgomery, 1994). Det andra tillvägagångssättet, är att upprita delavrinningsområden oberoende av markens lutningsförhållanden. Detta kan göras genom att dela upp avrinningsområdet efter avstånd till inflödespunkter till ledningsnätet, eller efter juridiska gränser, som fastighets- och tomtgränser.

Avståndsbaserad avgränsning av delavrinningsområden efter exempelvis avstånd till modelluppsättningens brunnar eller ledningar kan göras med hjälp av Thiessenpolygoner. Avgränsningen med Thiessenpolygoner tilldelar varje brunn/ledning en area (polygon) inom vilket alla punkter är närmst denna brunn/ledning i jämförelse med andra brunnar/ledningar

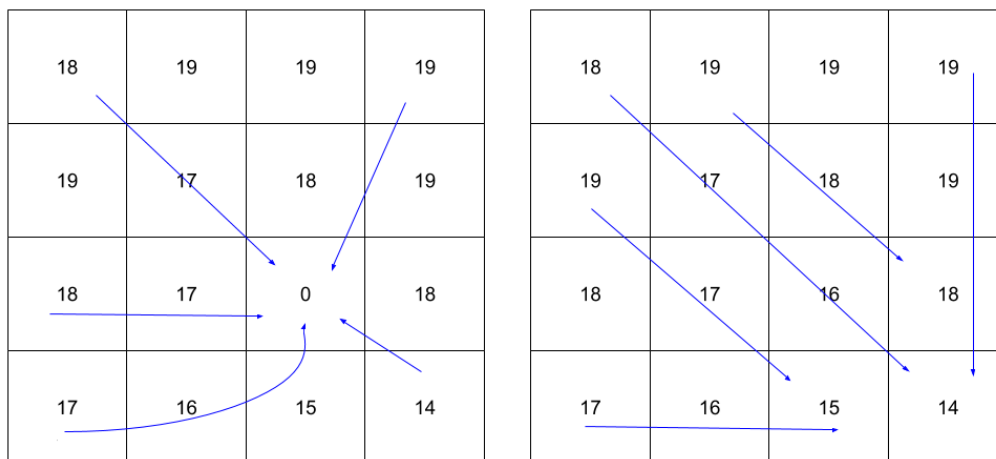


(Figur 3; Han & Bray, 2006). Denna avgränsningsmetod tar inte hänsyn till topografiska eller hydrologiska egenskaper i delavrinningsområdet.



**Figur 3** Thiessen-polygoner utifrån svarta punkter. Ingen punkt inom varje enskild polygon är närmare någon annan punkt än den associerade med polygonen. Källa: (Gomez Fernandez, 2007) Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 License.

Vid avgränsning efter topografisk information kan digital information om markhöjder användas för att ta beräkna flödesackumulation och flödesriktningar längs markytan och efter detta ta fram delavrinningsområden. Denna information finns tillgänglig i så kallade digitala höjdmodeller, eller DEM från engelskans *Digital Elevation Model*. En digital höjdmodell är en dataenhet innehållandes jämt fördelade datapunkter beskrivande höjdvärden refererade till ett geografiskt koordinatsystem (Mayhew, 2015). Den digitala höjdinformationen är lagrad i ett raster, vilket innebär att höjdpunkterna är fördelade i kvadratiska celler av en storlek motsvarande datas upplösning och i Sverige finns en nationell höjdmodell utgiven av Lantmäteriet med en upplösning av 2 m (Lantmäteriet, 2016). Från höjdmodellen kan flödesvägar från en cell till en annan i den riktning som lutningen är som brantast beräknas, var vatten ackumuleras, och slutligen delavrinningsområden tas fram (Jenson & Domingue, 1988). I höjdmodellerna förekommer oregelbundenheter som förhindrar att korrekta flödesvägar erhålls, om de lämnas obearbetade. Artificiella sänkor som uppkommit vid framtagningen av data ”stänger in” vatten i enstaka celler och förhindrar att korrekta flödesvägar kan beräknas. Detta problem kan förhindras genom att ”rekonditionera” höjdmodellen så att enstaka extremvärden tas bort och ersätts av interpolerade värden från omliggande celler (Figur 4). Efter att höjdmodellen rekonditioneras kan flödesvägar beräknas och delavrinningsområden tas fram. Om flödesvägsberäkningen ska ta hänsyn till ledningsnätets utbredning kan artificiella vattenvägar skapas i höjddata motsvarande ledningsnätets placering. Detta görs genom att sänka ner ledningsnätet i höjddata, med andra ord ges celler motsvarande ledningars och brunnars positionering ett lägre värde än markytan.



**Figur 4** En höjdmmodell där en sänka (t.v.) har interpolerats (t.h.) för att förhindra att vatten vid beräkning av flödesriktning ansamlas i den felaktiga cellen. Cellvärden indikerar höjd och pilar flödesriktning. Modifierat från ESRI (2018).

Delavrinningsområden kan även tas fram i kombination med annan tillgänglig områdesinformation som kartor över fastighetsgränser, byggnader, och markanvändning etc. I urbana områden kan detta vara tillräckligt för att beskriva avrinningsbildningen till avlopps nätet då landskapet är flackt och brunnar och ledningar är konstruerade efter fastighetsgränser och vägnätet (Rodriguez m.fl., 2003). Genom att ta hänsyn till byggnader, ledningsnät, vägar, diken och grönytor inom delavrinningsområdet kan en högre samstämmighet med verkligheten fås vid simuleringar av avrinningsbildningen (Kayembe & Mitchell, 2018; Zhang m.fl., 2014; Rodriguez m.fl., 2003).

Oavsett vilket alternativ för att avgränsa delavrinningsområden som används, görs vanligtvis en manuell kontroll mot flygfoton eller annan tillgänglig information för att se till att inga missvisande delavrinningsområden skapats. Beroende på vilken metod som använts för att avgränsa området kommer storleken, antalet och utformningen av delavrinningsområden att variera. Således kommer de generaliseringar som görs vid beskrivningen av delavrinningsområdets egenskaper att få olika stor betydelse och volymen vatten som når ledningsnätet vid en specifik nod att variera. En metod som resulterar i stora och få delavrinningsområden kräver mindre arbete, men riskerar att bli för generaliserande. Analogt kräver en metod som genererar många och små delavrinningsområden mer arbete, men riskerar att endast resultera i marginella förbättringar.

### 3. HYDRAULISK MODELLERING AV LEDNINGSNÄT

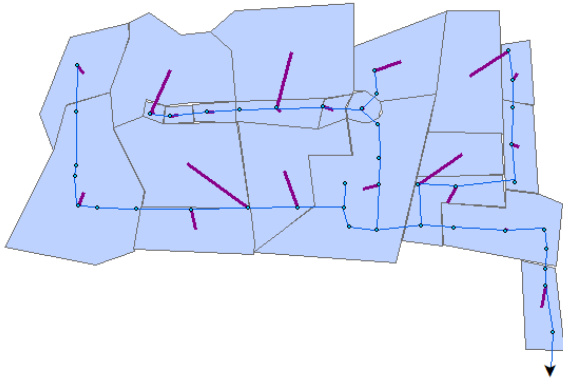
En hydraulisk modell kan användas för att beskriva hur vatten flödar genom kanalliknande system genom att behandla data om exempelvis energiförluster, dimensioner och lutningsförhållanden. En hydraulisk modell kan användas vid bland annat simulering av grundvattenflöden och naturliga vattendrag, eller som i detta fall, av vattenflöden i ledningsnät. Från hydraulisk modellering av ledningsnätet kan slutsatser dras om dimensioneringens tillräcklighet, om vid vilket flöde som dämning uppstår, om vid vilket flöde bräddning sker, och om vilka områden som riskerar översvämning vid olika regnhändelser (Blomqvist m.fl., 2016). I detta projekt har den ArcGIS-baserade hydrauliska modellen *MIKE URBAN* och den underliggande beräkningsmotorn *MOUSE* använts för att simulera ledningsnätets respons på regn. Modellen bygger på lösningar av *Saint Venant-ekvationerna*, vilka är partiella differentialekvationer som beräknar flöde och vattennivå i tid och rum i ett endimensionellt plan (Chow m.fl., 1988). Simuleringsprocessen i *MIKE URBAN* för denna studie kan konceptuellt delas upp i tre steg, ett första steg bestående av att modifiera en befintlig modelluppsättnings delavrinningsområden efter olika avgränsningsmetoder, därefter en hydrologisk simulering av regn och avrinningsbildning per delavrinningsområde, och slutligen en hydraulisk simulering av ledningsnätets respons. I studien har inte markens förmåga att lagra vatten, översvämningsutbredning, eller transportprocesser utmed markytan inkluderats.

Vid modellering av ett valt system måste de områdesspecifika förutsättningarna implementeras i modellen, genom inmatning av information och anpassning av modellparametrar. Den framtagna modelluppsättningen kan sedan kalibreras mot empiriska mätdata för att uppnå bättre överensstämmelse med det fysikaliska systemet, och därmed öka säkerheten i modellens förmåga att prediktera framtiden. Ofta finns det i modellen flertalet parametrar som kan justeras för att anpassa modelluppsättningen till empiriska data för att öka säkerheten i simuleringsresultaten. Efter kalibreringen anses modellen vara bättre anpassad till det komplicerade system den försöker efterlikna och kan utgöra ett mycket praktiskt verktyg för att teoretiskt undersöka olika scenarion. I modelleringssammanhang används ofta begreppet validering, i samband med kalibreringen, syftandes till att överensstämmelse med empiriska data är likvärdigt med en fullgod "validerad" beskrivning av den fysikaliska verkligheten, men en modell beskrivandes den fysikaliska verkligheten kan aldrig valideras då underliggande antaganden inte förmår redogöra för alla komplexa situationer i det verkliga systemet (Oreskes m.fl., 1994). Vid kalibreringen kan det även finnas mer än en parameterkombination som leder till god anpassning till empiriska värden (Beven, 2011). Därmed är det viktigt att beakta att en modell som uppvisar god överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta värden inte nödvändigtvis är detsamma som en korrekt beskrivning av verkligheten, utan kan ha uppstått som ett resultat av oförutsägbarheter i modellen. I detta arbete har skillnaden i simuleringsresultat som följd av olika avgränsningsmetoder undersökts. Ingen av de använda modelluppsättningarna med framtagna avgränsningsmetoder har kalibrerats mot empiriska data, varvid studien utgör en teoretisk jämförelse mellan de olika metodikerna. Studien har undersökt skillnader och likheter mellan avgränsningsmetoder, medan övriga modellparametrar hållits konstanta med syftet att öka förståelsen för metodvalets relevans. Studien har inte ämnat ta ställning till vilken metod som bäst lyckas återge den fysikaliska verkligheten, då detta enligt förda resonemang är problematiskt.

#### 3.1 MODELLUPPSÄTTNING

Studien har undersökt redan framtagna och justerade modelluppsättningar i programmet *MIKE URBAN* och därför diskuteras inte tillvägagångssättet för att sätta upp en modell genomgående.

Följande modellelement för ledningsnätet kan definieras i modellen: ledningar, diken, brunnar, magasin, bräddavlopp, överfall, pumpar, ventiler och utlopp (DHI, 2017b). För att modellera avrinningsbildningen definieras delavrinningsområden med följande modellparametrar: MIKE URBAN-ID (av användaren valt identifikationsnamn), plats, koordinater, area, tilläggsflöde, andel bidragande yta samt ytterligare hydrologiska parametrar som reduktionsfaktorer, koefficienter och volymsförluster (DHI, 2017c). Med informationen till hands kan sedan en modell av verkligheten byggas upp inom programvaran (Figur 5).



**Figur 5** Exempel på grafisk representation av en modelluppsättning och tillhörande element i MIKE URBAN: delavrinningsområden (ljusblå polygoner), ledningar (blå linjer), noder (blå punkter), kopplingar mellan delavrinningsområden (lila linjer) och noder, samt utlopp (svart pil).

Avgränsning av modellområdet i MIKE URBAN kan göras med verktyget *Catchment Delineation Wizard*. Verktyget tillåter framtagande av delavrinningsområden efter digitala höjdm modeller eller genom uppritande av Thiessenpolygoner. Framtagna och definierade delavrinningsområden sammanlänkas till en nod (brunn) på ledningsnätet där den simulerade mängden avrinning inledandes kommer att belasta nätet. Sammanlänkning kan göras automatiskt i MIKE URBAN genom verktyget *Catchment Connection Wizard* vilket länkar delavrinningsområden till närmsta brunn eller manuellt. En manuell kontroll kan göras för att korrigera att sammanlänkningen stämmer överens med ledningsnätets utformning. Avgränsningen, de resulterande delavrinningsområden, och dess sammanlänkning till noderna i modelluppsättningen blir viktiga i modelleringsskedet då delavrinningsområdet ligger till grund för beräkning av förväntad avrinning som sedan belastar ledningssystemet.

### 3.2 AVRINNINGSMODELLERING

För att simulera en regnhändelse och resulterande avrinningsbildning per delavrinningsområde behöver ett randvillkor i form av en regn-tidsserie implementeras i modellen. Detta kan vara en empirisk mätserie eller ett fiktivt skapat regn, ett så kallat designregn. För att simulera avrinningsbildningen för valda modelluppsättningar användes i denna studie ett CDS-regn (Chicago Design Storm) (Keifer and Chu, 1957 refererad i Marsalek & Watt, 1984). CDS-regnet består av mindre så kallade blockregn, vilka är fiktiva regn av konstant regnintensitet över en kortare tidsrymd. CDS-regnets varaktighet, intensitet och utformning bestäms statistiskt utifrån historiska mätserier. Regnintensiteten erhålls från samband mellan återkomsttiden och varaktigheten på regnet (ekvation 2) (Dahlström, 2010).

$$R_{ij} = \frac{190\tau_i^{1/3} \ln(\Delta\tau_j)}{\Delta\tau_j^{0,98}} + 2 \quad (2)$$

där

$$R_{ij} = \text{Regnintensitet} \left[ \frac{l}{s*ha} \right]$$

$$\tau_i = \text{Återkomsttid [månad]}$$

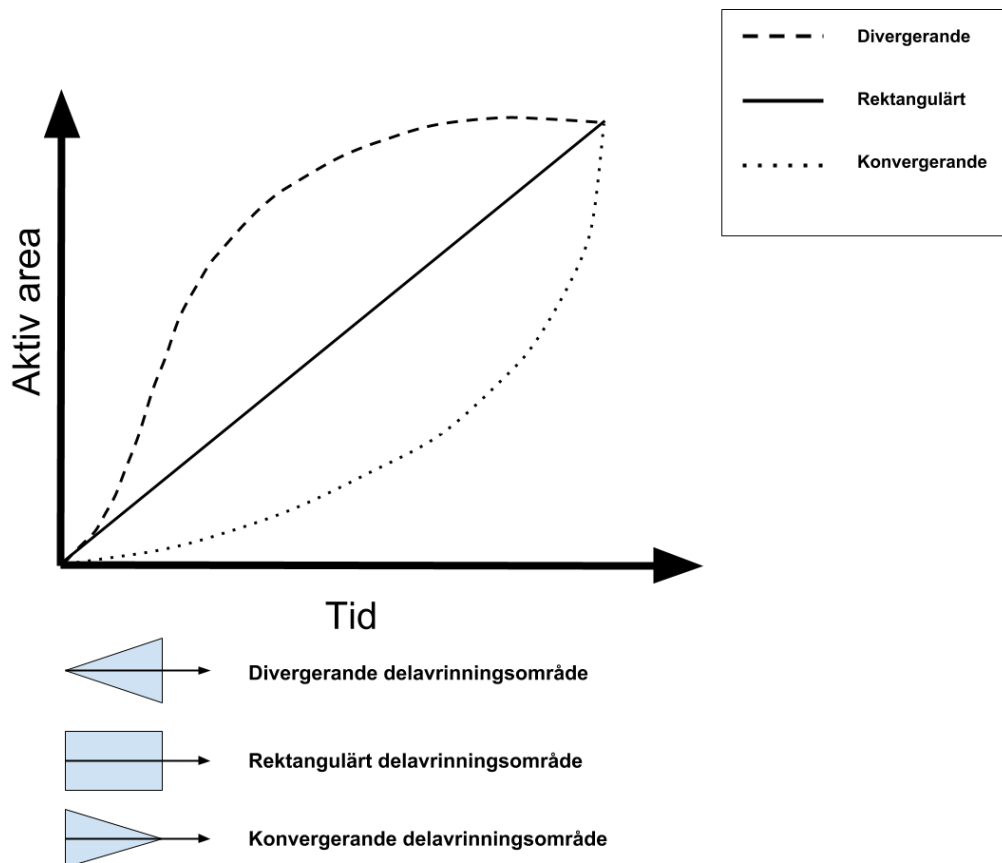
$$\Delta\tau_j = \text{varaktighet [minuter]}$$

Återkomsttiden, som är ett säkerhetsmått, anger sannolikheten för en viss typ av regn baserat på historiska mätserier. Exempelvis är ett 10-års-regn det genomsnittliga regn som kan förväntas inträffa en gång under de kommande 10 åren utifrån historiska data (SMHI, 2018).

I MIKE URBAN kan avrinningen från modelluppsättningens delavrinningsområden simuleras enligt fyra olika metoder: ”time/area method” (tid-area-metoden), ”non-linear reservoir method”, ”linear reservoir method” och ”unit hydrograph method” (DHI, 2017c). Den simulerade mängden avrinning som genereras från modelluppsättningens delavrinningsområden beräknades i denna studie enligt *tid-area-metoden*. Tid-area-metoden tar hänsyn till att mängden avrinning som når ledningssystemet via brunnar och serviser varierar i rummet och i tiden. Volymen avrinning till ledningssystemet bestäms efter andelen yta som bidrar till avrinning per delavrinningsområde (beroende av markanvändningen), delavrinningsområdets koncentrationstid (den tid det tar för avrinning att färdas från den längsta rinnvägen till utloppet) och hur stor del av delavrinningsområdet som aktivt bidrar till avrinningen vid varje tidssteg. Områden längre uppströms i delavrinningsområdet bidrar till avrinningen i utflödespunkten med en tidsfördröjning, den så kallade koncentrationstiden, jämfört med områden nära utflödespunkten. Den första mängden regn som faller, 0,6 mm, antas inte ge upphov till någon avrinning för att ta hänsyn till att vatten initialt kan ansamlas i ojämnheter innan det avrinner till ledningssystemet (Blomqvist *m.fl.*, 2016). Denna beskrivning av avrinningsbildningen gestaltas i form av tid-area-kurvor som skapas för varje delavrinningsområde, där den aktiva arean visas som funktion av tiden. Tid-area-kurvornas form bör spegla formen hos delavrinningsområdet, för att på bästa sätt beskriva avrinningsbildningens förändring i tiden (DHI, 2017c). I MIKE URBAN ges fyra alternativa former på tid-area-kurvan, *TA curve A*, *TA curve B*, *TA curve C* och en variant som kan anpassas av användaren själv. *TA curve A* är anpassat för ett rektangulärt delavrinningsområde, medan *TA curve B* är anpassat för ett divergerande område, och *TA curve C* för ett konvergerande område (Figur 6). Med tid-area-kurvor för de delavrinningsområden som bidrar till avrinning i varje nod kan avrinningen till noden beräknas för varje tidssteg genom att summera kurvorna från delavrinningsområdena. I MIKE URBAN implementeras tid-area-metoden genom att användaren för varje delavrinningsområde anger:

- ❖ andel bidragande yta,
- ❖ koncentrationstiden,
- ❖ och en reduktionsfaktor.

Reduktionsfaktorn beskriver ingen fysikalisk storhet utan används vid kalibrering av delavrinningsområdena, genom att öka eller minska andelen yta som bidrar till avrinningen i (Blomqvist *m.fl.*, 2016). Inga reduktionsfaktorer för framtagna delavrinningsområden har använts, då kalibrering ej ingått i studien.



**Figur 6** Teoretiska tid-area-kurvor för divergent (B), rektangulärt (A), och konvergent delavrinningsområde (C). Vid en regnhändelse över ett divergent delavrinningsområde minskar ökningen av den aktiva arean med tiden, medan den ökar för ett konvergent delavrinningsområde. För ett rektangulärt delavrinningsområde ökar den aktiva arean konstant med tiden. Koncept från DHI (2017c).

### 3.3 LEDNINGSNÄTSMODELLERING

Resultatet från avrinningsmodelleringen används som randvillkor till ledningsnätssimuleringen. Det resulterande flödet och trycknivåer i ledningssystemet beräknas baserat på Saint Venant-ekvationerna och bygger på principerna om massans bevarande (ekvation 3) och rörelsemängdens bevarande (ekvation 4) (DHI, 2017b)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA I_f = gA I_0 \quad (4)$$

där

$Q = \text{flöde} [m^3 s^{-1}]$

$A = \text{tvärsnittsarea} [m^2]$

$y = \text{flödesdjup} [m]$

$g = \text{tyngdaccelerationen} [ms^{-2}]$

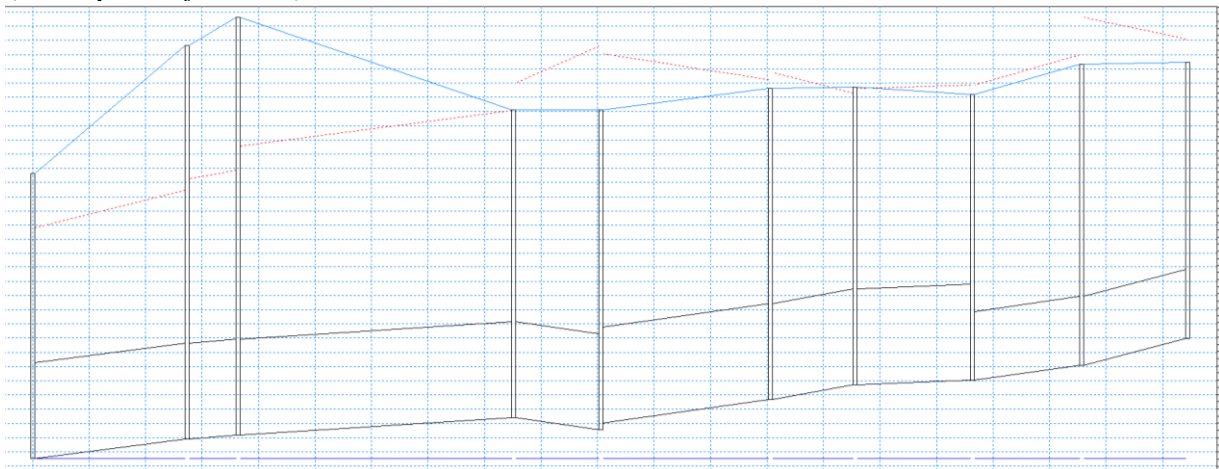
$x = \text{avstånd längs flödesriktning} [m]$

$t = \text{tid} [s]$



$\alpha$  = hastighetsfördelningskonstant  
 $I_0$  = lutning ledningsbotten  
 $I_f$  = friktionslutning

Programvaran beräknar löpande flödet och vattendjupet i varje ledningssegment och nod i ett så kallat beräkningsnät för varje tidssteg. En ledning i nätet representeras av ett segment med minst tre beräkningspunkter, en beräkningspunkt för vattendjupet i början och slutet av segmentet, och en beräkningspunkt för flödet i mitten av segmentet (DHI, 2017a). Brunnar representeras som enskilda noder med ett beräknat värde för vattendjupet. Från simuleringen kan vattendjup och trycknivåer jämföras mot ledningshjässa och marknivå (Figur 7). Vid utredning av ledningsnätets funktion är det framför allt av intresse att analysera resultaten av högsta trycknivå över hjässa och högsta trycknivå över marknivå, då detta ger indikation om när ledningars kapacitet överskrids och det därmed föreligger risk för dämning/översvämning (Blomqvist *m.fl.*, 2016).



**Figur 7** En simulerad regnhändelse för en utvald ledningsnätsträcka där den högsta beräknade trycknivån i meter vattenpelare (röd linje) visas i förhållande till ledning (svarta mer eller mindre horisontella linjer), noder/brunnar (svarta vertikala linjer) och marknivå (blå heldragen linje). I mitten av figuren ses hur den högsta trycknivån under simuleringen har överstigit marknivån, vilket innebär att marköversvämning fås. Även risk för källaröversvämning förekommer när trycklinjen stiger över hjässan på ledningen (övre svarta horisontella linjen) och närmar sig markytan.

Vid simuleringens slut genereras en sammanfattning av de olika typer av vattenvolymer som funnits i systemet under simuleringen. I sammanfattningen ges en balansekvation som redogör för volymförhållanden före, under och efter simuleringen och kan användas för att bedöma simuleringens tillförlitlighet i förhållande till valt tids-steg (ekvation 5). Vid instabiliteter kan modellen skapa fiktivt vatten,  $V_{genererat}$ , som kompensation inom systemet. Detta syns då i balansekvationen och kan åtgärdas genom att sänka tidssteget.

$$B = (V_{slut} - V_{start}) - (V_{in} - V_{ut} + V_{genererat}) \quad (5)$$

Där

$B$  = Vattenbalans [ $m^3$ ]

$V_{slut}$  = Volym vatten i systemet vid simuleringens slut [ $m^3$ ]

$V_{start}$  = Volym vatten i systemet vid simuleringens start [ $m^3$ ]

$V_{in}$  = Totalt inflöde [ $m^3$ ]

$V_{ut} = \text{Totalt utflöde [m}^3\text{]}$

$V_{genererat} = \text{Genererad volym vatten inom systemet [m}^3\text{]}$



## 4. MATERIAL OCH METOD

Sex olika metoder för att avgränsa delavrinningsområden testades för sex olika områden där färdiga modelluppsättningar i MIKE URBAN fanns att tillgå. Av de sex avgränsningsmetoderna var två noggranna, baserade på såväl höjddata som information om bebyggelse på detaljnivå. Utöver dessa noggranna metoder valdes fyra mer generaliserande metoder ut för jämförelse mot de noggranna. Tillsammans med de nya delavrinningsområdena togs även nya parametervärden för delavrinningsområdenas egenskaper fram, koncentrationstid och andel bidragande yta, eftersom dessa ändras när delavrinningsområdesgränserna förändras. Simuleringar genomfördes i MIKE URBAN för varje område med de nya delavrinningsområdesgränserna och de nya områdesegenskaperna. De resulterande delavrinningsområdena och resultaten från simuleringarna i MIKE URBAN med avseende på maximalt vattendjup i modelluppsättningarnas noder jämfördes mot varandra. De simulerade maximala vattennivåerna i modelluppsättningarnas brunnar jämfördes mot varandra med avseende på numerisk variation, rumslig variation, klassificering efter jämförelse mot ledningshjässa, samt under- respektive överskattning i jämförelse med de detaljerade metoderna. Slutligen värderades subjektivt metod III–VI:s arbetsinsats i jämförelse med samstämmigheten i simuleringresultat med de detaljerade metodernas (I och II).

### 4.1 OMRÅDESBESKRIVNINGAR

Modelluppsättningar erhöles från *Stockholm vatten och avfall*, *Sundbyberg avfall och vatten*, *Tekniska verken* och *Göteborg kretslopp och vatten*. En del av den information som använts för studien är skyddad under offentlighets- och sekretesslagen. Detaljerad platsinformation om ledningsnätet eller information om dess beskaffenhet får på grund av detta inte presenteras i rapporten. De sex modelluppsättningarna anonymiserades med alfabetisk indexering för att skydda känslig information. De erhållna modelluppsättningarna varierade i typen av modell (spillvatten, dagvatten, spill & dagvatten), typ av ledningssystem i modellområdet (separerat, kombinerat, delvis kombinerat), områdesarea och bebyggelsetyp (Tabell 1).

**Tabell 1** Områdeskaraktäristiska för de anonymiserade modelluppsättningarna

Modelluppsättning	Modell/Ledningssystem	Area [ha]	Typ av område
E	Spillvatten/kombinerat & separerat	394	Innerstad
F	Dagvatten/separerat	65	Innerstad
J	Spillvatten/separerat	138	Industriområde
K	Spillvatten/separerat	132	Innerstad
L	Spillvatten/separerat	59	Förort
M	Spillvatten/separerat	358	Förort

## 4.2 DATAHANTERING

Den data som erhållits från *Stockholm vatten och avfall*, *Sundbyberg avfall och vatten*, *Tekniska verken* och *Göteborg kretslopp och vatten* bestod av digital geografisk information om spill- och dagvattenledningar, serviser, brunnar, bearbetade höjddata, fastighetskartor, och avrinningsområden och modelluppsättningar i MIKE URBAN (bilaga A). Ingen annan data har använts till studien, förutom flygfoton över modellområdena från Lantmäteriet. Den vanligaste filtyp som hanterats är shape-filer och raster-filer. Shape-filer (.shp) är punkter, linjer, eller polygoner, med en geografisk referens som kan ha utvalda egenskaper (attribut) kopplade till sig, medan raster-filer (.tif) är filer av cellstruktur där varje cell tilldelats ett numeriskt värde. Rasterfilerna i denna studie har representerat topografiska markhöjder. För att modifiera den geografiska informationen för att ta fram delavrinningsområden har programmet ArcGIS använts och verktygslådorna (toolbox) *spatial analyst* och *arc-hydro*, programmet Scalgo (ScalgoApS, 2019) och verktyget *Catchment Delineation Wizard* i MIKE URBAN använts (bilaga B). Simulering av avrinningsbildning och ledningssystemet, samt bearbetning av resultat har skett i MIKE URBAN.

## 4.3 AVGRÄNSNINGSMETODER

Två detaljerade metoder för att avgränsa delavrinningsområden inom modellområdet, metod I och metod II, togs fram baserat på höjddata, ledningsnät och fastighetsgränser. Därefter togs fyra andra metoder fram, metod III–VI, vilka krävde mindre områdesinformation och en mindre arbetsinsats i jämförelse med de två detaljerade metoderna. Dessa förenklade metoder var topografisk höjdanalys med DEM och ledningsnät, topografisk höjdanalys med DEM och byggnader, Thiessenpolygoner baserat på brunnars läge samt Thiessenpolygoner baserat på ledningars läge.

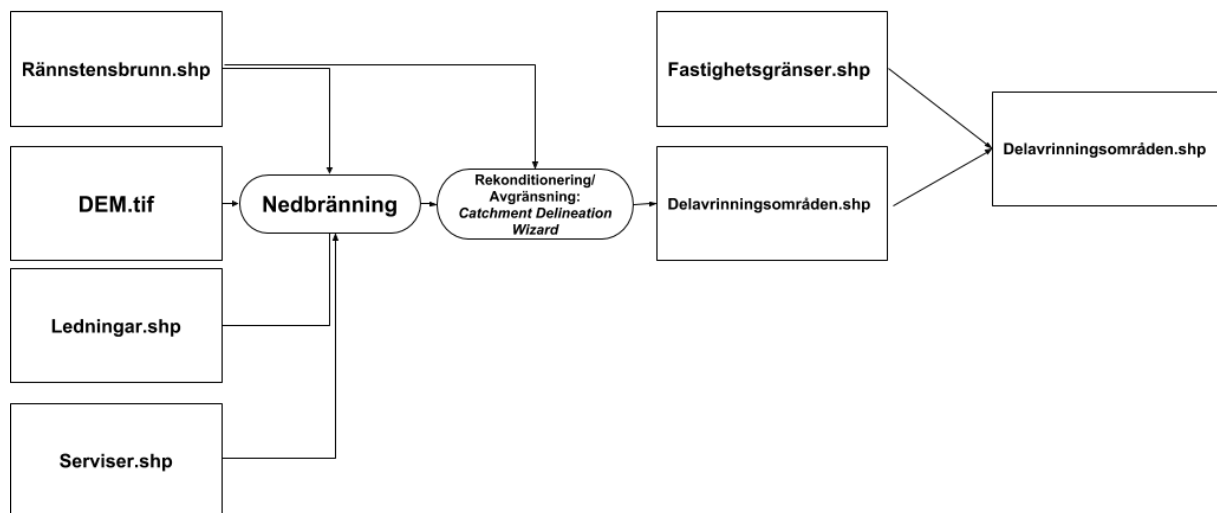
### 4.3.1 Metod I: Höjddata, rännstensbrunnar, ledningar & fastighetsgränser

*Metod I* bestod av att delavrinningsområden avgränsades efter en hybridmetod där höjddata, ledningsnät och information om fastighetsgränser nyttjades (Figur 8).



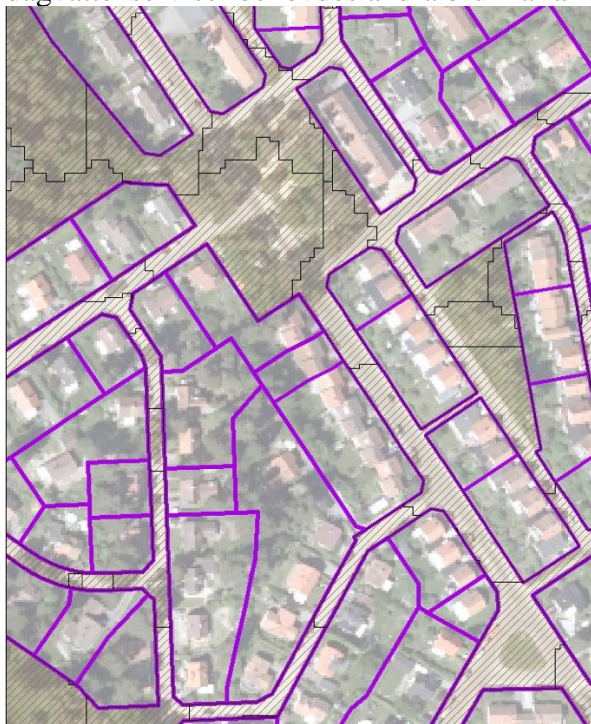
**Figur 8** Höjddata (t.v.) från vilket delavrinningsområden över icke bebyggd mark togs fram, baserad på laserdata från Lantmäteriet: Höjddata 2m Raster © Lantmäteriet. Fastighetsgränser (t.h., röda linjer) i kvartersmark från Fastighetskartan © Lantmäteriet. Bakgrundsfoto: GSD-Ortofoto, 1m färg © Lantmäteriet. Bilderna visar samma kvarter som inte ingått i studien, men med något olika utsträckning.

Till avgränsningsmetoden behövdes datafiler innehållandes rännstensbrunnar, ledningar, serviser, höjddata och fastighetsgränser. En shape-fil motsvarande endast rännstensbrunnar togs fram genom att välja ut och extrahera dessa från erhållen fil över alla brunnar inom modellområdet. För att med höjddata analysera flödesvägar längs markytan till ledningssystemet behövdes ledningar, serviser och brunnar infogas i höjddata. Detta gjordes genom att bränna ned (sänka) de cellvärden i höjddata som motsvarade ledningar samt serviser med 1 meter, och cellvärden motsvarande rännstensbrunnar med 2 meter. Bearbetningen gjordes med *ArcHydro*-verktyget *DEM Recondition* i ArcGIS. Modifierade höjddata rekonditionerades och flödesriktningar analyserades, varvid delavrinningsområden utefter rännstensbrunnar togs fram, med verktyget *Catchment Delineation Wizard* i MIKE URBAN. Delavrinningsområden motsvarande fastighetsgränser togs fram utifrån Lantmäteriets fastighetskarta och klipptes ihop med delavrinningsområdena erhållna från höjddata i ArcGIS. Vid sammanfogningen av de två filerna gavs fastighetsgränserna prioritet. Arbetsgången sammanfattas i Figur 9.



**Figur 9** Metodik för framtagande av delavrinningsområden enligt metod I.

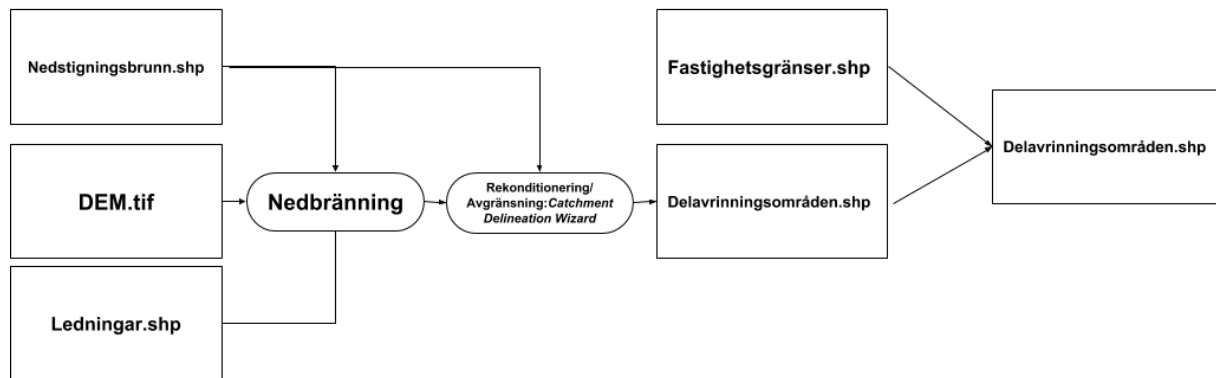
Resultatet av avgränsningen gav delavrinningsområden som fångar upp bebyggda områden med fastighetsgränser och övriga områden genom avgränsningen baserat på höjddata med nedsänkt ledningssystem (Figur 10). Denna metod är tillämpbar vid modellering av dagvattenförande system eller kombinerade system, då rännstensbrunnar och serviser leder regnvatten direkt ned till modellerat dagvattenförande ledningssystem. Vid modellering av spillvattenförande system som inte är sammanlänkat med rännstensbrunnar eller dagvattenserviser behövdes andra brunnar användas för att avgränsa modellområdet.



**Figur 10** Delavrinningsområden framtagna med metod I efter höjddata (streckade områden) och fastighetsområden (lila inringade områden). Bakgrundsfoto: GSD-Ortofoto, 1m färg © Lantmäteriet

#### 4.3.2 Metod II: Höjddata, nedstigningsbrunnar, ledningar och fastighetsgränser

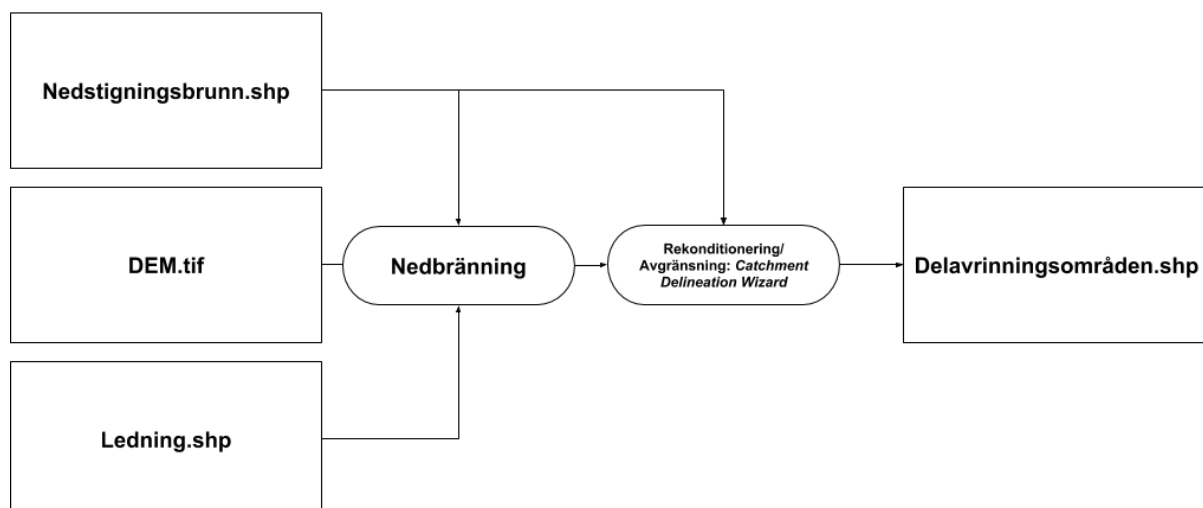
*Metod II* följde samma tillvägagångssätt som *metod I*, men med en skillnad. För denna metod valdes att basera framtagandet av delavrinningsområden från höjddata på nedstigningsbrunnar istället för rännstensbrunnar, samt att inte inkludera serviserna i nedbränningen (Figur 11). Nedstigningsbrunnar valdes då *metod I* inte är tillämpbar på modelluppsättningar av spillvattenförande separata system där rännstensbrunnar och dagvattensserviser inte är en del av det modellerade systemet. *Metod II* möjliggör att en detaljerad metod också kan användas för de modelluppsättningar som inte inkluderar dagvattenförande ledningar. Metoden är även tillämpbar för kombinerade system, där både nedstignings- och rännstensbrunnar finns kopplade till systemet, men antas inte vara en lika god approximation som *metod I*. För modellerade kombinerade modelluppsättningar av spillvatten och för den separerade modelluppsättningen av dagvatten har både *metod I & II* använts för att kunna se om valet av brunn medför någon skillnad mellan de detaljerade metoderna.



**Figur 11** Metodik för framtagande av delavrinningsområden enligt metod II. Nedstigningsbrunnar, ledningar, serviser, höjddata, och fastighetsgränser, användes för att ta fram slutliga delavrinningsområden inom modellområdet.

#### 4.3.3 Metod III: Topografisk höjdanalys med DEM och ledningssystem

*Metod III* bestod av att endast basera avgränsningen på höjddata, ledningsnät och nedstigningsbrunnar. För avgränsningsmetoden behövdes shape-filer innehållandes nedstigningsbrunnar, höjddata och ledningsnät. En shape-fil med endast nedstigningsbrunnar extraherades från given shape-fil över modellområdets alla brunnar. Cellvärden motsvarande nedstigningsbrunnar och ledningar brändes ned (sänktes) i höjddata till 1 respektive 2 meter med hjälp av *ArcHydro*-verktyget i ArcGIS. Modifierade höjddata rekonditionerades och flödesriktningar analyserades, varvid delavrinningsområden utefter nedstigningsbrunnar togs fram, med verktyget *Catchment Delineation Wizard* i MIKE URBAN (Figur 12).



**Figur 12** Flödesschema över metodik för framtagande av delavrinningsområden enligt metod III. Nedstigningsbrunnar, ledningar, och höjddata användes för att ta fram slutliga delavrinningsområden inom modellområdet.

#### 4.3.4 Metod IV: Topografisk höjdanalys med DEM och byggnader

Metod IV baserades helt och hållet på avgränsning utanför användargränsnittet i MIKE URBAN. Med hjälp av programmet Scalgo togs delavrinningsområden för varje modellområde fram baserat på topografiska höjddata över markytan och byggnaders placering (Figur 13). Programmet erbjuder tillgång till hydrologiska analyser av redan rekonditionerad och bearbetade höjddata. Till skillnad från Metod III valdes att avgränsa delavrinningsområden baserade på höjddata där alla byggnaders tak höjts upp med 10 meter över markytan. Utifrån denna topografiska data analyserades modellområdets lågpunkter och flödesackumulering för en regnmängd <1 mm. Modellområdets avgränsades efter de områden som identifierats. De framtagna delavrinningsområdena inom valt modellområde exporterades från programmet och importerades till modelluppsättningarna i MIKE URBAN med verktyget *Import/Export Wizard*.



**Figur 13** Metod för framtagande av delavrinningsområden enligt metod IV. Programmet Scalgo användes för att baserat på höjddata och förhöjda byggnader ta fram delavrinningsområden inom modellområdet.

#### 4.3.5 Metod V: Thiessenpolygoner baserat på nedstigningsbrunnar

Metod V baserades på Thiessenpolygoner för att ta fram delavrinningsområden utifrån nedstigningsbrunnar. Till avgränsningsmetoden behövdes en fil innehållandes nedstigningsbrunnar. Verktyget *Catchment delineation wizard* i MIKE URBAN användes för att avgränsa området i delavrinningsområden baserat på avståndet till närmsta nedstigningsbrunn (Figur 14). I verktyget valdes Thiessenpolygoner som avgränsningsmetod och

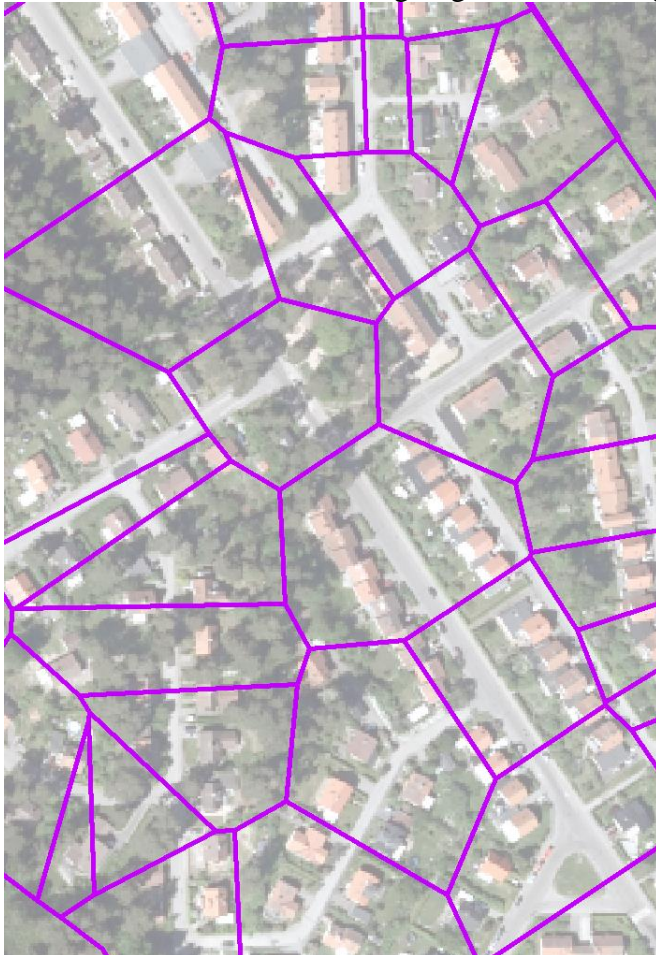


modelluppsättningens noder som indata. För att avgränsningen skulle bygga på nedstigningsbrunnar byttes modelluppsättningens alla noder ut mot noder motsvarande endast nedstigningsbrunnar med verktyget *Import/Export Wizard*.



**Figur 14** Flödesschema för framtagande av delavrinningsområden enligt metod V. Thiessenpolygoner baserat på nedstigningsbrunnar användes för att ta fram delavrinningsområden inom modellområdet.

Metoden genererade delavrinningsområden utan att ta hänsyn till några fler egenskaper hos modellområdet förutom nedstigningsbrunnarnas läge (Figur 15).



**Figur 15** Delavrinningsområden framtagna efter Thiessenpolygoner baserade på nedstigningsbrunnar. Bakgrundsfoto: GSD-Ortofoto, 1m färg © Lantmäteriet

#### 4.3.6 Metod VI: Thiessenpolygoner baserat på ledningar

Metod VI baserades likt föregående metod på Thiessenpolygoner, men där polygonerna/delavrinningsområdena togs fram utifrån mittpunkten hos befintliga ledningssegment istället för nedstigningsbrunnar. Till avgränsningsmetoden användes en fil innehållandes modelluppsättningens ledningssegment. Verktöget *Catchment delineation wizard* i MIKE URBAN användes för att ta fram Thiessenpolygoner motsvarande delavrinningsområden (Figur 16). I verktöget valdes Thiessenpolygoner som avgränsningsmetod och modelluppsättningens ledningssegment som indata.



**Figur 16** Metod för framtagande av delavrinningsområden enligt metod VI.

*Thiessenpolygoner baserat på ledningar användes för att ta fram delavrinningsområden inom modellområdet.*

#### 4.3.7 Manuell korrigering

Varje modifierad modelluppsättning med tillhörande delavrinningsområde per respektive avgränsningsmetod jämfördes med en kartbild (ortofoto) över modellområdet för att manuellt urskilja eventuella delavrinningsområden som fått en orimlig utsträckning. Vissa avgränsningsmetoder genererade ett antal delavrinningsområden som antingen sträckte sig utanför modellområdet, som överlappade andra delavrinningsområden, eller hade en mycket liten area. De identifierade delavrinningsområdena i behov av korrigering modifierades/togs bort manuellt.

### 4.4 AVRINNINGS- OCH LEDNINGSNÄTSSIMULERING

För att kunna simulera avrinningsbildningen i MIKE URBAN behövdes andelen bidragande yta och koncentrationstider per delavrinningsområde beräknas. För att beräkna andelen bidragande yta per delavrinningsområde valdes en schablons-baserad metod som krävde att varje delavrinningsområde klassificerades enligt valda kriterier. De erhållna modelluppsättningarna innehöll inga klassificeringar enligt vald metod, utan dessa togs fram som en del av studien. Andelen bidragande yta beräknades genom att klassificera varje delavrinningsområde efter områdestyp, anslutningstyp, och markanvändning (Tabell 2). Områdestypen för delavrinningsområdena klassificerades som innerstad, förort eller gles bebyggelse. Därefter jämfördes varje delavrinningsområde mot ett flygfoto varvid typen av bebyggelse klassificerades som en av följande: villor med stor tomt (V1), villor med liten tomt (V2), flerbostadshus öppet byggnadssätt (F1), flerbostadshus slutet byggnadssätt (F2), Industri/Centrum (I), övrig yta (C). För delavrinningsområden med fler än en typ av bebyggelse, valdes bebyggelseklassificeringen efter den dominerande typen. Slutligen jämfördes delavrinningsområdena mot shape-filer över ledningsnätet och serviser och en av följande anslutningstyper tilldelades delavrinningsområdena: Separerat (S), delvis kombinerat (DK), kombinerat (K). För modelluppsättningar över spillvattennät klassificerades delavrinningsområden med dagvattenledningar i gata och från fastigheter som separerade system, medan system utan dagvattenledningar klassificerades som kombinerade. I de fall

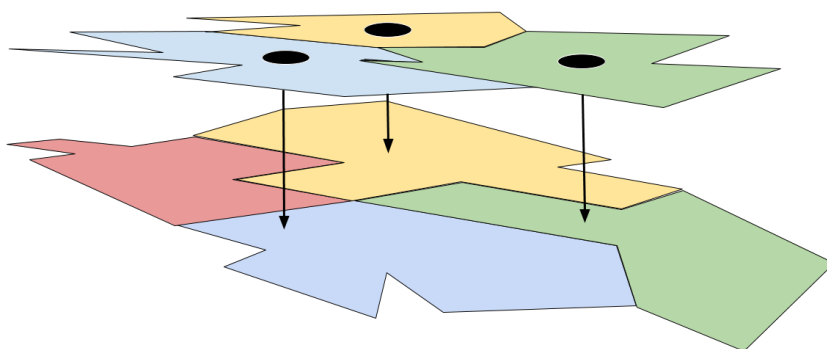


dagvattenledning funnits i gata, men inte kopplat till fastigheter, klassificerades dessa delavrinningsområden som delvis kombinerade. För modelluppsättningar över dagvattennät klassificerades alla delavrinningsområden som kombinerade. Varje klassificering av områdestyp, anslutningstyp, och markanvändning sparades som ett attribut till varje delavrinningsområde.

**Tabell 2** Avrinningskoefficienter ( $\varphi$ ) för spillvattennät baserat på områdestyp, markanvändning och anslutningstyp (K, DK, S, där K = kombinerat system, DK = delvis kombinerat system och S =separerat system); (Blomqvist m.fl., 2016).

Kod	Markanvändning	Områdestyp								
		Innerstad/tätort (1)			Förort/mindre samhälle (2)			Gles bebyggelse (3)		
		K	DK	S	K	DK	S	K	DK	S
V1	Tak, Villa stor tomt/Fritidshus	0,9	0,9	0,09	0,45	0,45	0,09	0,22	0,18	0,04
V2	Tak, Villa med liten tomt	0,9	0,9	0,135	0,675	0,675	0,135	0,425	0,36	0,08
R	Tak, Radhus/Kedjehus	0,9	0,9	0,18	0,75	0,75	0,18	0,5	0,45	0,12
F1	Tak, Flerbostad, öppet byggnadssätt	0,9	0,9	0,18	0,8	0,8	0,18	0,55	0,5	0,12
F2	Tak, Flerbostad, slutet byggnadssätt	0,9	0,9	0,18	0,9	0,9	0,18	0,63	0,54	0,12
I	Tak, Industri/Centrum	0,9	0,9	0,18	0,9	0,9	0,18	0,63	0,54	0,12
GV	Gatuyta	0,9	0	0	0,8	0	0	0,56	0	0
C	Övrig yta/grönyta	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0

När en metods delavrinningsområden var klassificerade användes dessa för att snabbare kunna klassificera efterkommande metoders delavrinningsområden inom samma modellområde. Klassificeringar överfördes mellan de olika avgränsningsmetoderna genom att låta de oklassificerade delavrinningsområdena ärva information från de redan bearbetade delavrinningsområdena inom vilket dess geografiska masscentrum föll, med hjälp av verktyget *Spatial Join* i ArcGIS (Figur 17). Dessa ärvda klassificeringar granskades mot flygfoto och ledningsnätet för att säkerställa att inget delavrinningsområde ärvt en klass som inte stämde mot bakgrundsdata (flygfoto och ledningsnät).



**Figur 17** Konceptuell bild över hur klassificeringar ärvt mellan delavrinningsområdena med verktyget *Spatial Join* i ArcGIS. De övre delavrinningsområdena ärver klassificeringen (färg) motsvarande färgen av den underliggande polygon som dess masscentrum (svart cirkel) faller inom.

#### 4.4.1 Bidragande yta

För att beräkna delavrinningsområdenas bidragande yta användes följande data: shape-fil med klassificerade delavrinningsområden, shape-fil med tak-polygoner och en shape-fil med gatuytor (Figur 18).



**Figur 18** Tak- och vägyta användes för att beräkna delavrinningsområdenas bidragande yta. Bilden är exemplifierande och området har inte ingått i studien.

Med hjälp av programmet *Feature Manipulation Engine* (FME) beräknades den sammanlagda arean tak, arean gatuyta och övrig area per delavrinningsområde. På detta sätt associerades varje enskilt framtaget delavrinningsområde med en inneboende tak-area, väg-area, och en ”övrig” area. Varje beräknad area associerades med en avrinningskoefficient ( $\varphi$ ) baserad på delavrinningsområdets klassificering (Tabell 2), där avrinningskoefficienten beskriver hur stor del av en yta, från 0 till 1 som bidrar till avrinning, där värdet 1 indikerar att hela ytan bidrar (Svenskt Vatten, 2016). Schablonerna i Tabell 2 är framtagna för spillvattennät, men i det fall ett dagvattennät modellerats klassificerades alla delavrinningsområden som kombinerade.

En sammanvägd avrinningskoefficient för varje enskilt delavrinningsområde, synonymt med delavrinningsområdets bidragande yta, beräknades för varje delavrinningsområde genom att ta hänsyn till delavrinningsområdets klassificering samt till arean gatuyta, takyta och övrig yta/grönnya inom delavrinningsområdet (ekvation 6). Beräkningen av delavrinningsområdenas bidragande yta gjordes i FME.

$$\varphi_{tot} = \frac{A_T * \varphi_{Ti} + A_{GV} * \varphi_{GVi} + A_C * \varphi_{Ci}}{A_T + A_{GV} + A_C} \quad (6)$$

där

$\varphi_{tot}$  = Sammanvägd avrinningskoefficient

$A_T$  = Area tak

$A_{GV}$  = Area gatuyta

$A_C$  = Area övrig yta

$\varphi_{Ti}$  = Avrinningskoefficient takklassificering enligt tabell 2

$\varphi_{GVi}$  = Avrinningskoefficient för gatutytor enligt tabell 2

$\varphi_{Ci}$  = Avrinningskoefficient för övrig yta enligt tabell 2

#### 4.4.2 Koncentrationstid

Delavrinningsområdenas koncentrationstid beräknades utifrån en erfarenhetsbaserad metod som baseras på delavrinningsområdets storlek (Blomqvist m.fl., 2016) (ekvation 7).

$$t_c = 5 + \frac{3 \times \sqrt{A}}{60} \quad (7)$$

där

$t_c$  = Koncentrationstid [min]

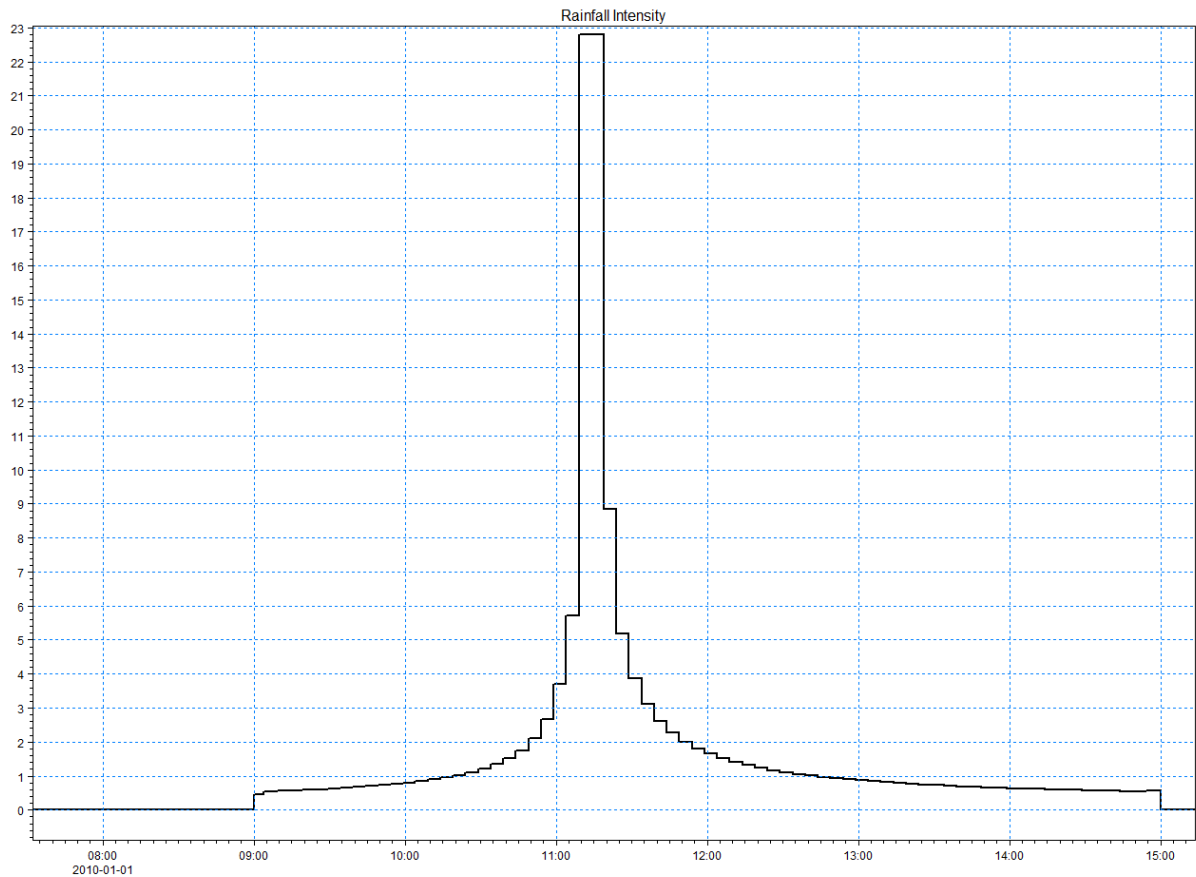
$A$  = Delavrinningsområdets area [ $m^2$ ]

Koncentrationstiden beräknades per delavrinningsområde med programmet FME. Koncentrationstiden i modellen innefattar utöver rinntiden genom delavrinningsområdet också rinntiden via anordningar som stuprör och serviser till ledningsnätet. På grund av detta ansätts den kortast möjliga koncentrationstiden till 5 minuter (ekvation 7) även för delavrinningsområden med liten area.

#### 4.4.3 Simulering

De framtagna delavrinningsområdena importerades till modelluppsättningarna i MIKE URBAN med verktyget *Import/Export Wizard*. Den beräknade bidragande ytan (sammanvägd avrinningskoefficient) och beräknad koncentrationstid infördes under modellparametrarna *Imperviousness* (andel bidragande yta) respektive *Time of concentration* (koncentrationstid) per delavrinningsområde. Efter import associerades varje delavrinningsområde med ett utlopp, närmsta nod (brunn) på ledningsnätet, med modellverktyget *Catchment Connection Wizard*. Kopplingen mellan delavrinningsområde och nod på ledningsnätet korrigerades manuellt efter ledningsnätets utbredning så att inget delavrinningsområde kopplats till en del av ledningsnätet som skulle innebära att vattnet flödar mot ledningens lutning. I största möjliga mån eftersträvades att varje delavrinningsområde kopplades till närmsta nod nedströms i ledningsnätet.

Avrinningen simulerades från varje delavrinningsområde för ett CDS-regn anpassat för svenska förhållanden med återkomsttid 10 år, en total varaktighet på 6 timmar, och ett maximalt blockregn på 22,8  $\mu\text{m/s}$  (82.1 mm/h) under 10 minuter (Figur 19). Med koncentrationstiden och andelen bidragande yta simulerades avrinningen till ledningsnätet för alla delavrinningsområden under ett dygn och femton timmar med ett tidssteg av 60 sekunder. Avrinningsmängden simulerades med tid-area-metoden och *TA-curve A*.



**Figur 19** Det CDS-regn som belastade delavrinningsområdena under simuleringsperioden.

Simuleringsresultaten från avrinningsbildningen användes som indata till simuleringen av ledningsnätets respons, som exekverades för tidsspännet ett dygn och femton timmar. Inledningsvis valdes tidssteget fem minuter, men i de fall den slutliga balansekvationen (ekvation 5) resulterat i att fiktivt vatten genererat i modellen översteg 1% av det totala inflödet sänktes tidssteget till en minut. Från simuleringen sammanställdes resultatet av högsta vattendjup [mvp] i alla noder förutom noder längs med tryckledning och noder definierade som utlopp.

#### 4.4.4 Resultatjämförelse

För att kunna jämföra de olika avgränsningsmetoderna och deras påverkan på simuleringsresultaten sammanställdes det maximalt uppnådda vattendjupet i modelluppsättningarnas noder. Utifrån dessa beräknades även absolutbeloppet av avvikelserna mellan den detaljrikaste metoden och övriga metoder. För att utvärdera metodernas inverkan på antalet noder vars vattendjup överstiger ledningshjässan jämfördes simuleringsresultaten mot ledningarnas diametrar, inlagda i modelluppsättningen. Dessa diametrar motsvarar inte

nödvändigtvis de verkliga ledningarnas diametrar, då dessa kan variera i form i verkligheten. I modelluppsättningarna var alla ledningar approximerade till att vara cirkulära. Utöver detta sammanställdes antalet gånger som varje avgränsningsmetod beräknat det högsta respektive lägsta maximala vattendjupet för varje nod i varje modelluppsättning.

Slutligen gjordes en förenklad kostnad-nytta-analys där de enkla metoderna värderades subjektivt efter tidsåtgång, och efter överrensstämmelse med de detaljerade metodernas simuleringsresultat. För att värdera tidsåtgången beräknades antal tidsenheter som varje metod bedömts motsvara efter antal indata, korrigeringsbehov, och antal använda programverktyg. Antalet indata värderades motsvara en tidsenhet var, då varje datafil har krävt bearbetning för att implementeras i de verktyg som använts. Antalet använda programverktyg har värderats motsvara en halv tidsenhet, då varje nytt verktyg har inneburit ytterligare modifikation av data. De resulterande delavrinningsområdena har ibland behövts korrigeras och metoderna har värderats efter om mycket korrigering behövts, viss korrigering behövts, eller om ingen korrigering behövts, motsvarande en halv tidsenhet, en fjärdedels tidsenhet respektive ingen betydelse för tidsbehovet. Den uppskattade tidsåtgången  $t$  per metod blir således en sammanvägd värdering av antal indata  $D$ , antal använda program  $P$ , och korrigeringsbehovet  $K$  (ekvation 8). Sammanställning av tidsenheter möjliggör en uppskattning av hur metoderna förhåller sig mot varandra oberoende av modellerarens färdigheter eller modelluppsättningens beskaffenhet, till skillnad från att kvantifiera tidsbehovet i antal timmar.

$$t = D * 1 + P * 0,5 + K \quad (8)$$

där

$D = \text{Antal indata}$

$P = \text{Antal programverktyg}$

$K = \text{korrigeringsbehov: stort}=0,5, \text{ visst korrigeringsbehov}=0,25, \text{ ingen påverkan}=0$

Överrensstämmelse mot detaljerade metoder bedömdes efter hur många fler noder ( $\Delta n$ ) som beräknats att ej ge upphov till dämning (högsta vattendjupet når ej upp till ledningshjässa) för de enkla metoderna ( $n$ ) i jämförelse med den mest detaljerade metoden ( $n_{\text{detaljerad}}$ ) (ekvation 9). Om den enklare metoden gett färre noder utan dämning än den detaljerade metoden sattes  $\Delta n=0$ . Skillnaden summerades för alla modelluppsättningar och jämfördes mellan metoderna.

$$\Delta n = n - n_{\text{detaljerad}},$$

$$\text{om } n - n_{\text{detaljerad}} < 0, \Delta n = 0 \quad (9)$$

där

$\Delta n = \text{Positiv skillnad i antal noder utan dämning}$

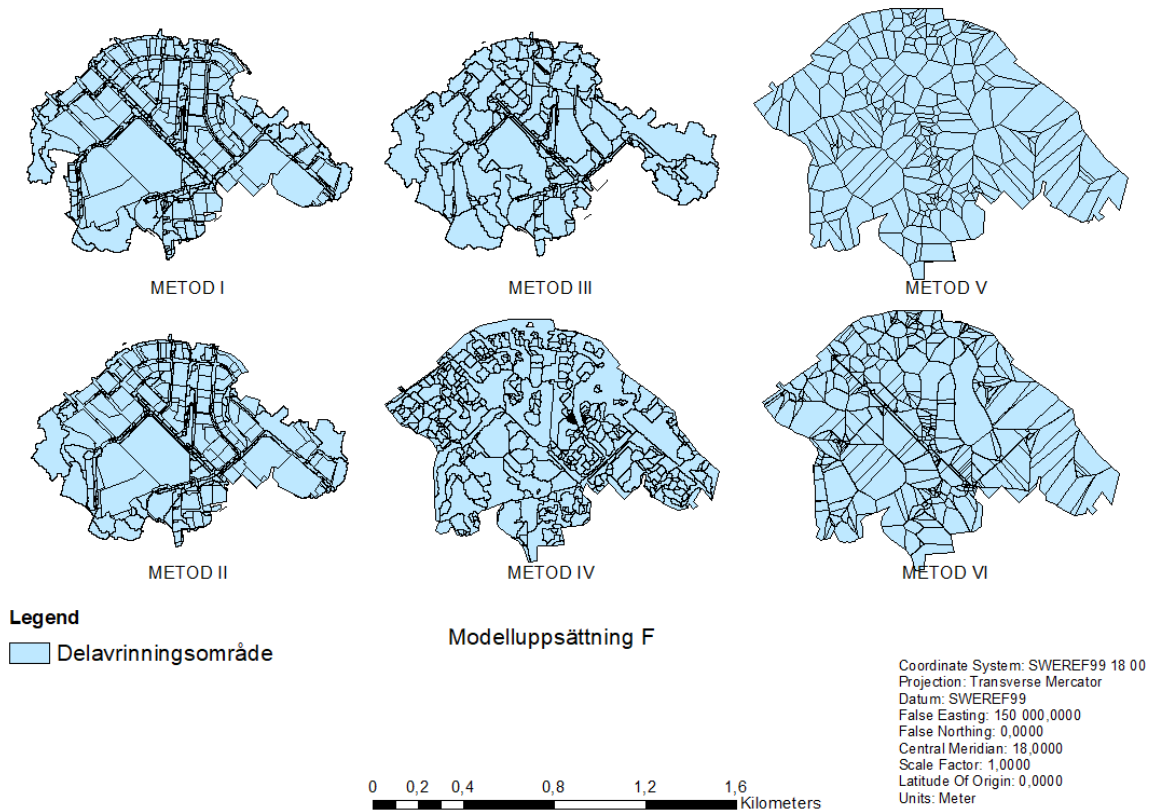
$n = \text{Antal noder utan dämning för enkel metod}$

$n_{\text{detaljerad}} = \text{Antal noder utan dämning för detaljerad metod}$

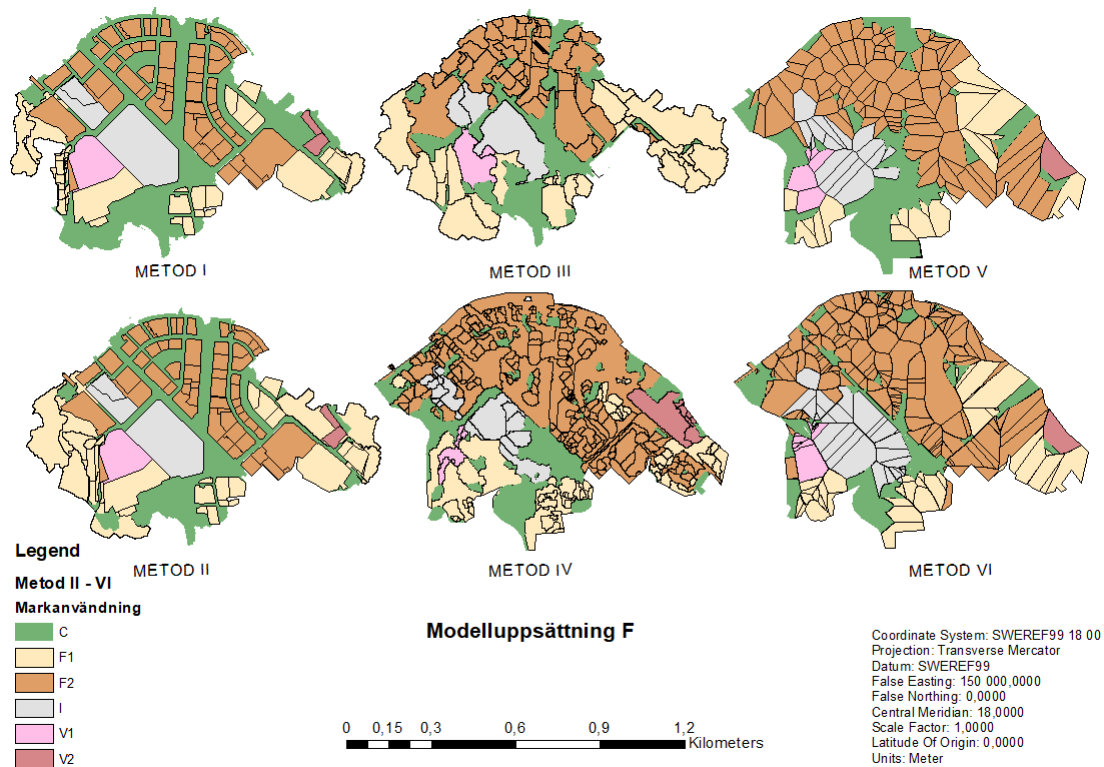
## 5. RESULTAT

### 5.1 DELAVRINNINGSOMRÅDEN

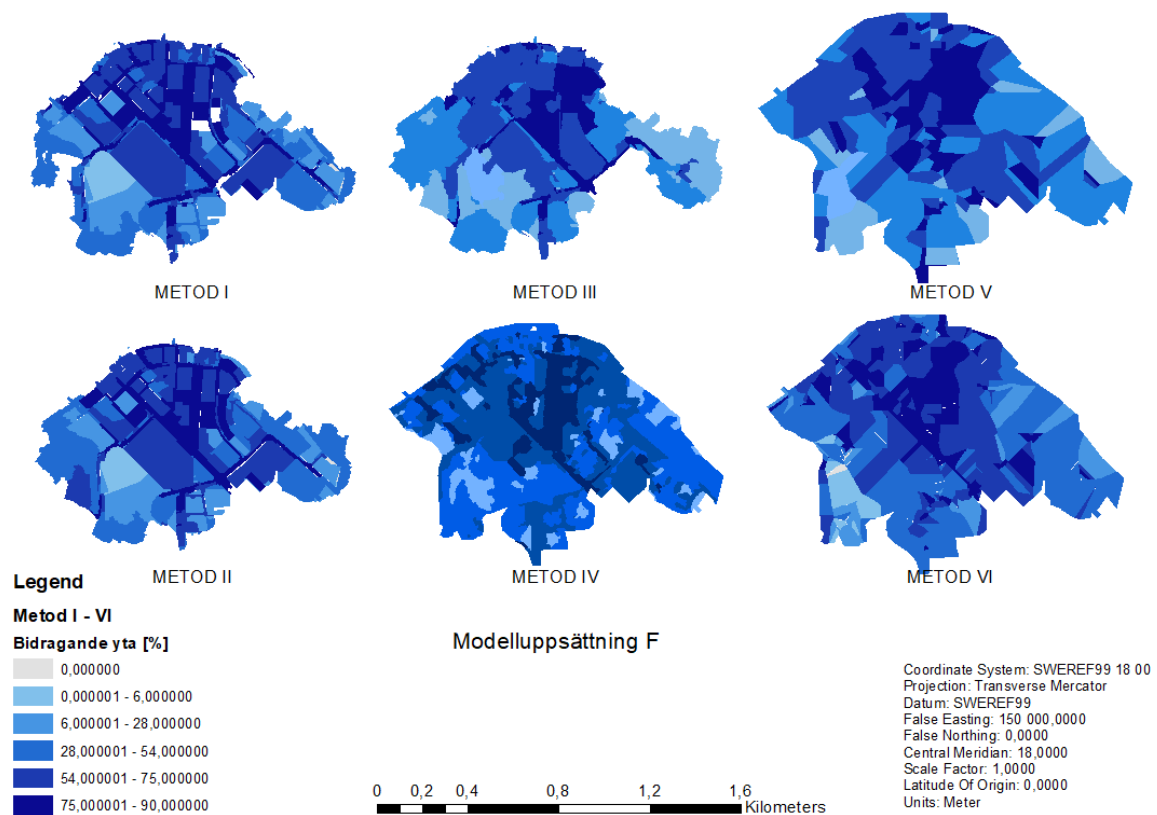
De olika avgränsningsmetoderna resulterade i mellan 254 och 440 stycken delavrinningsområden, av varierande storlek och form för modelluppsättning F (Figur 20). Efter klassificering och beräkning av andel bidragande yta resulterade de enklare metoderna i en lägre upplöst beskrivning av modellområdet (Figur 21; Figur 22). Framtagna delavrinningsområden för alla modelluppsättningar presenteras under bilaga C. Klassificering av markanvändning och beräkning av andel bidragande yta för metod och modelluppsättning redovisas under bilaga D samt bilaga E.



**Figur 20** Delavrinningsområden för modelluppsättning F framtagna med avgränsningsmetod I–VI. De olika avgränsningsmetoderna genererade olika många delavrinningsområden av varierande storlek och form.



**Figur 21** Delavrinningsområden klassade efter markanvändning enligt tabell 2 för modellområde F och avgränsningsmetod I–VI.



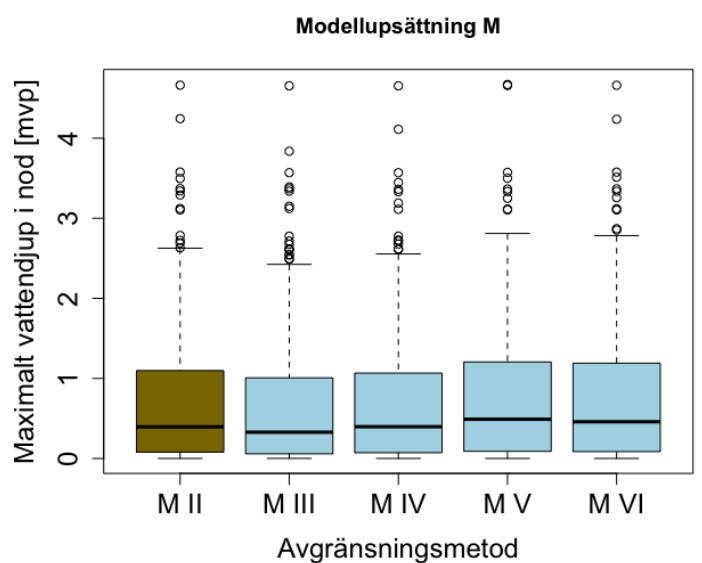
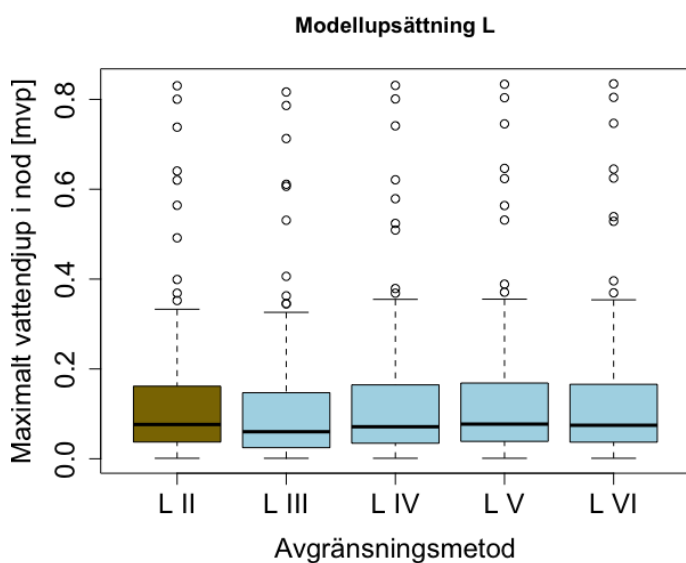
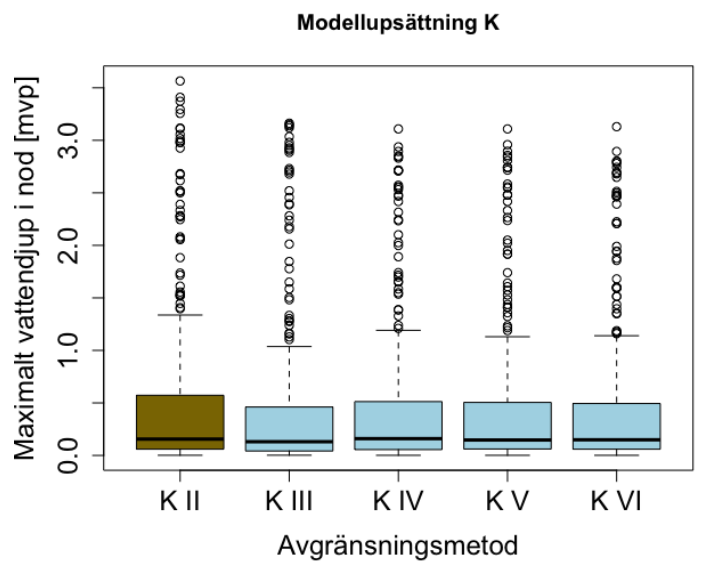
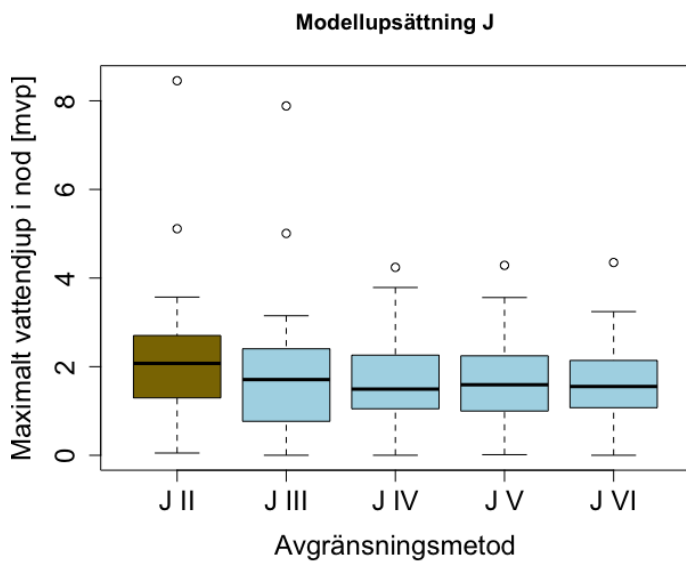
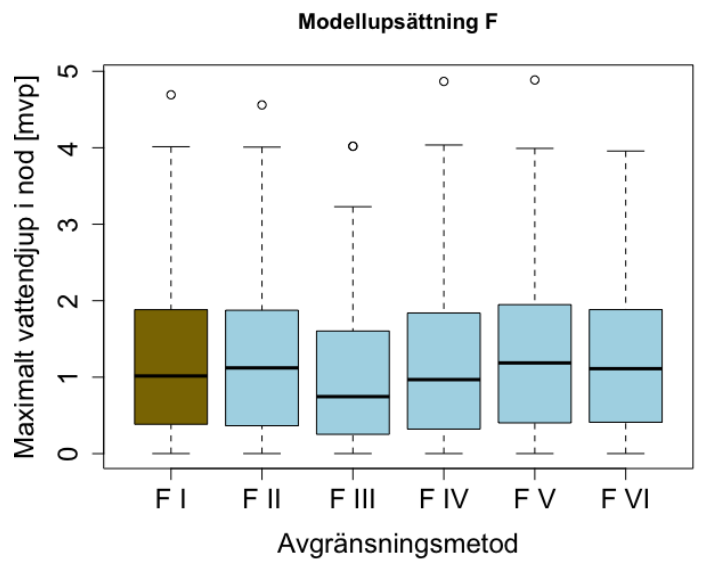
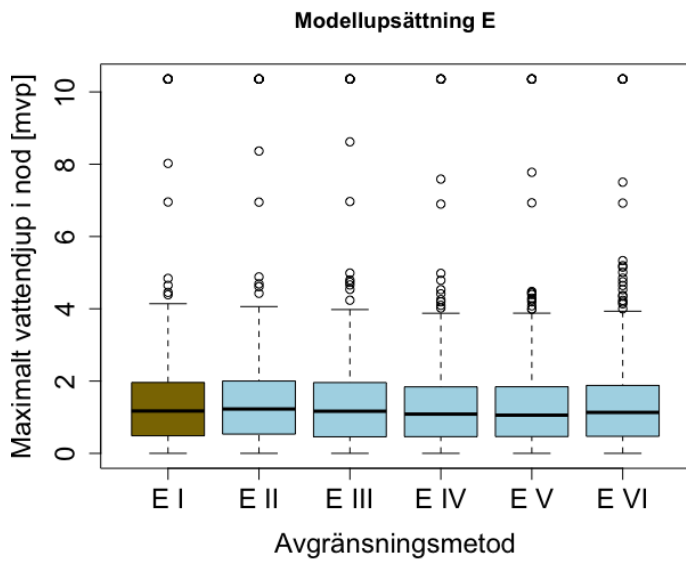
**Figur 22** Beräknad andel bidragande yta per delavrinningsområde för modelluppsättning F och metod I–VI.

Metod I–II har med störst detaljeringsgrad fångat in modellområdets bebyggelse och topografiska egenskaper i relation till ledningsnätet, vilket blir tydligt vid klassificering av markanvändning och resulterande andel bidragande yta i jämförelse med de förenklade metoderna (Figur 20–21). Metod III har resulterat i förhållandevis stora delavrinningsområden vilket innebär att en stor mängd vatten som i verkligheten skulle rinna till flertalet skilda brunnar i modellen kopplas samman med en brunn. Alla metoder förutom metod IV bygger i någon mån på information om ledningsnätet medan denna metod istället enbart utgjorts av en flödesanalys på markytan och upphöjda byggnader. Metoden har resulterat i såväl små delavrinningsområden som ger en detaljerad upplösning av bebyggelsen, som stora delavrinningsområden som inte fångar in enskilda byggnader. Metod V och VI har inte fångat in bebyggelsen i mindre områden, utan resulterat i förhållandevis många rektangulärt formade delavrinningsområden.

## 5.2 SIMULERAT MAXIMALT VATTENDJUP

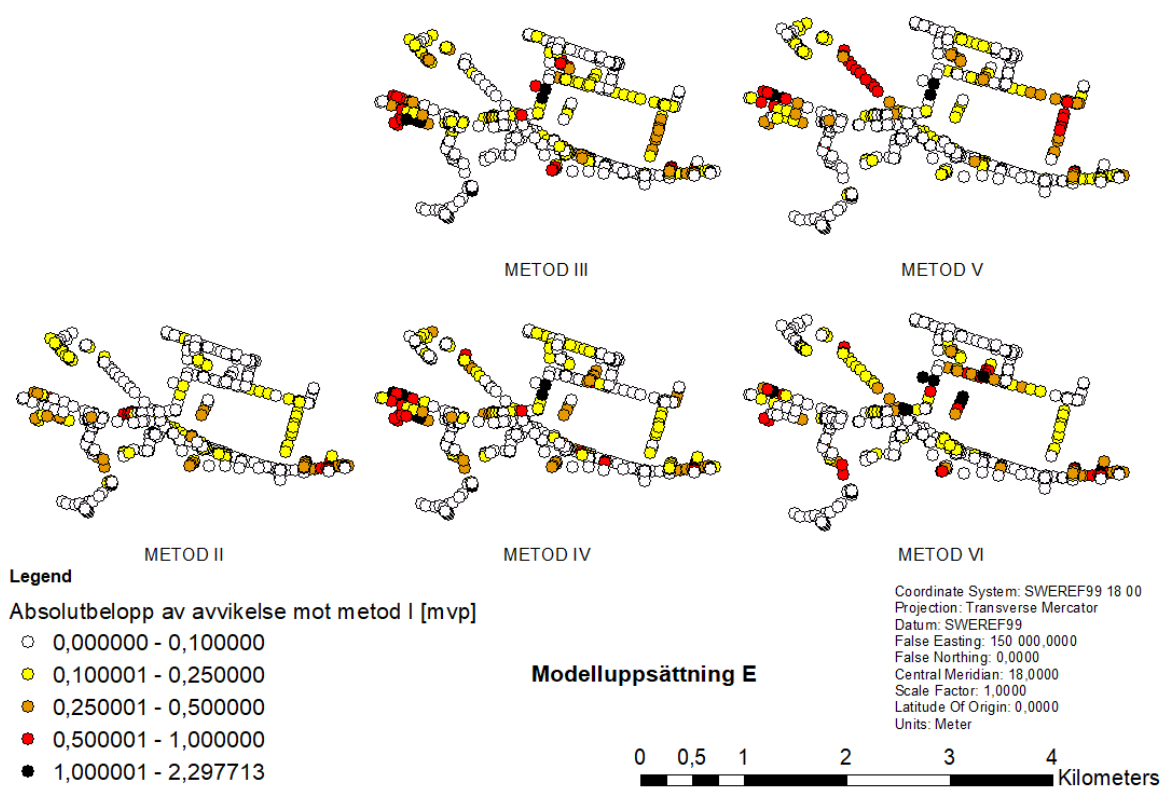
De olika avgränsningsmetoderna gav upphov till skillnader i det simulerade maximala vattendjupet i modelluppsättningarnas noder. Spridningen med avseende på simulerat maximalt vattendjup i modelluppsättningarnas noder för de olika avgränsningsmetoderna visas i figur 23 i form av låddiagram med median, kvartilavstånd, och ”outliers”. Skillnader har uppkommit som ett resultat av att de olika avgränsningsmetoderna resulterat i varierande antal och olika stora delavrinningsområden, som påverkat hur mycket simulerad avrinning som belastar olika brunnar/noder i modelluppsättningen vid olika tidpunkter under simuleringsperioden. En viss variation mellan antalet utliggare varierar mellan metod och modellområde. Inget tydligt uppreparande mönster mellan modelluppsättningarna går att urskilja utöver att metod III och IV har lägre medianer än övriga metoder i fem av sex modelluppsättningar (F, J, K, L, M). Av de modelluppsättningar där både Metod I och Metod II kunnat användas uppvisar metod II något högre värden i jämförelse med metod I.



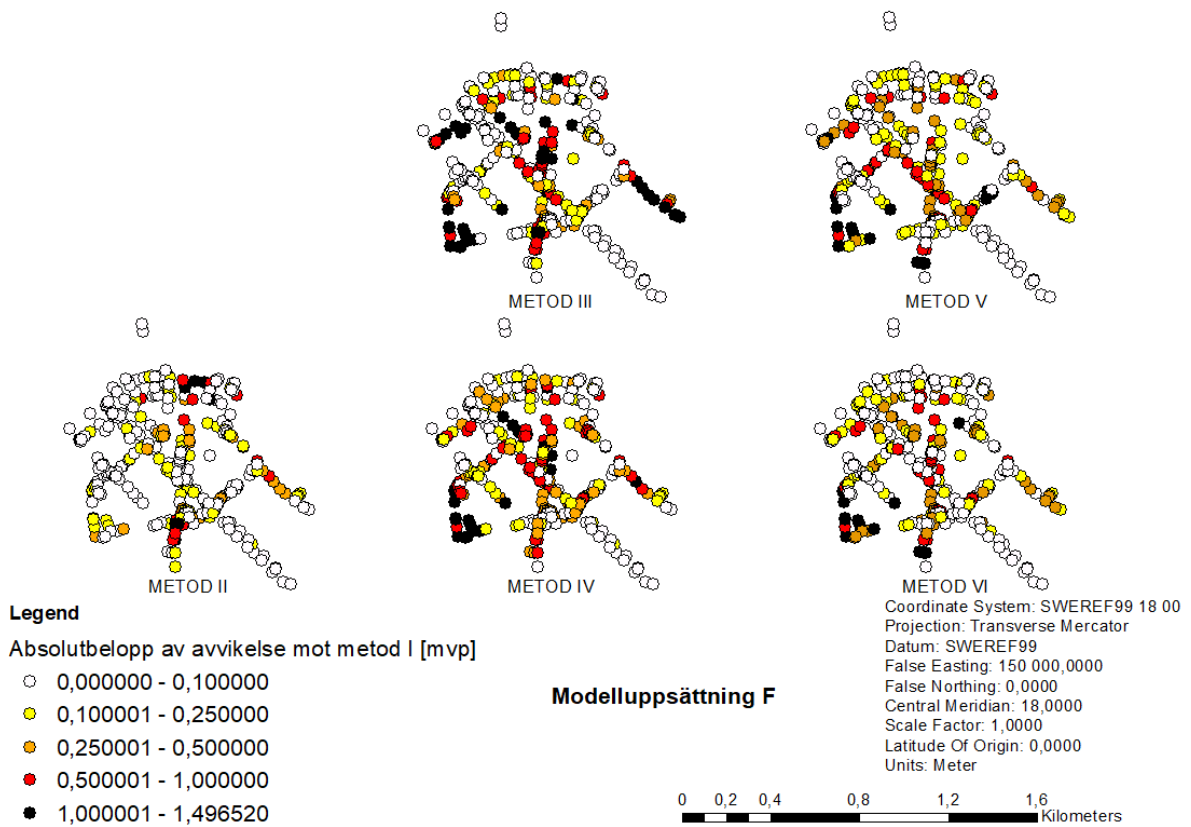


**Figur 23** Lådidiagram med median, kvartilavstånd och "outliers" för maximalt simulerat vattendjup i alla noder per modellupsättning och metod. Gyllene färg indikerar den mest detaljerade metoden.

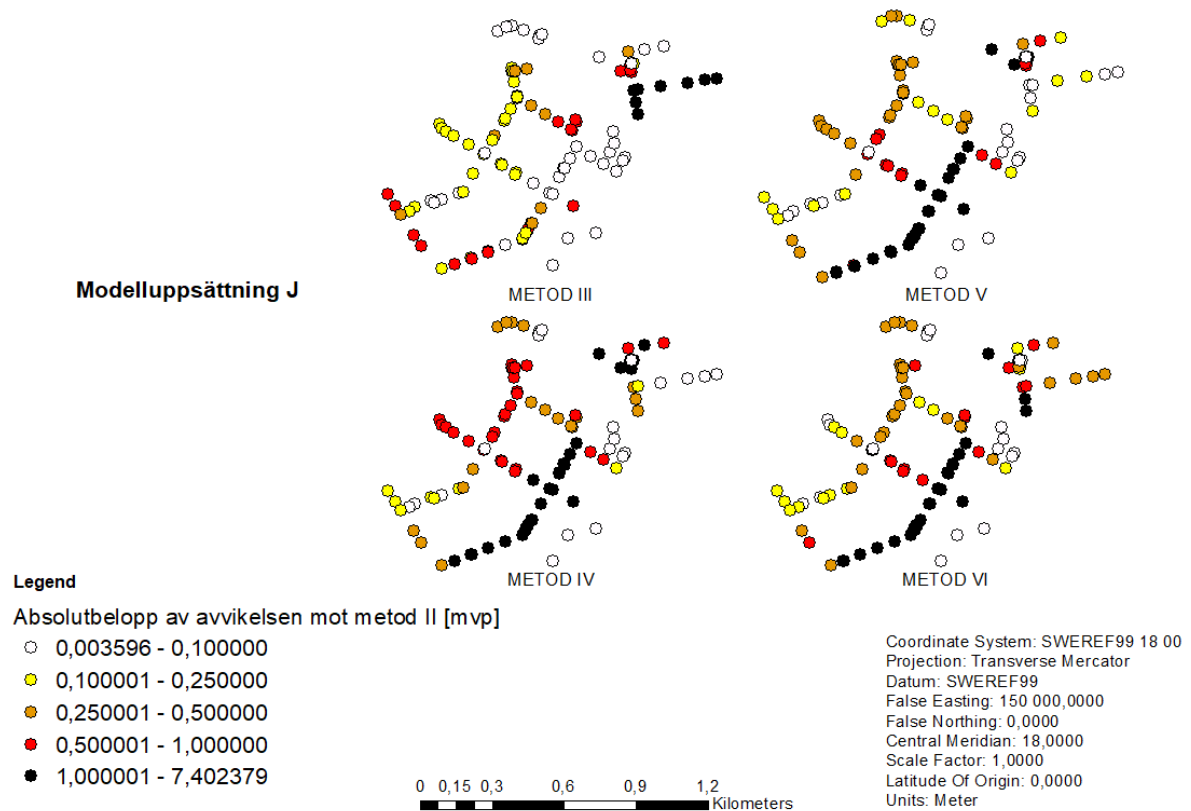
Modelluppsättningarna E, F och J (Figur 24; Figur 25; Figur 26) uppvisade ett större antal avvikelser än övriga modelluppsättningar (Figur 27; Figur 28; Figur 29). Endast ett fåtal avvikelser mellan detaljerad och enkla metoder erhöles för modelluppsättning L (Figur 28). Vidare sågs att större avvikelser tenderar att uppkomma i modelluppsättningens utkant, medan de områden som motsvarar ledningsnätets huvudstråk uppvisar mindre avvikelse. Vid jämförelse mot digitala ledningskartor bekräftades detta, men visas inte i rapporten med hänsyn till den sekretessöverenskommelse som omfattar studien.



**Figur 24** Avvikelse mot metod I för beräknat maximalt vattendjup i modelluppsättning E och metod II–VI.

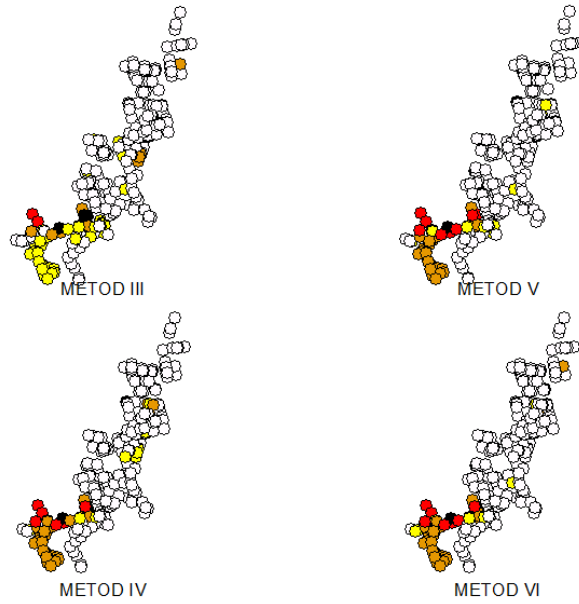


**Figur 25** Avvikelse mot metod I för beräknat maximalt vattendjup i modelluppsättning F och metod II–VI.



**Figur 26** Avvikelse mot metod II för beräknat maximalt vattendjup i modelluppsättning E J och metod III–VI.

**Modelluppsättning K**



**Legend**

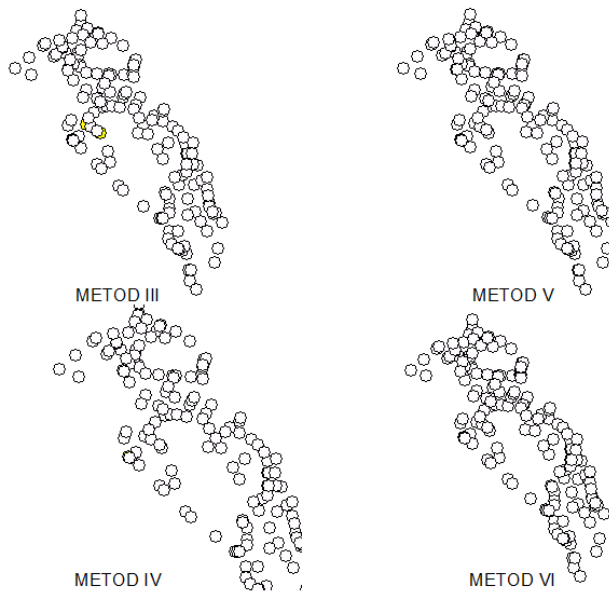
Absolutbelopp av avvikelse mot metod II [mvp]

- 0,000000 - 0,100000
- 0,100001 - 0,250000
- 0,250001 - 0,500000
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 2,686111

Coordinate System: SWEREF99 18 00  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: SWEREF99  
 False Easting: 150 000,0000  
 False Northing: 0,0000  
 Central Meridian: 18,0000  
 Scale Factor: 1,0000  
 Latitude Of Origin: 0,0000  
 Units: Meter

**Figur 27** Avvikelse mot metod II för beräknat maximalt vattendjup i modelluppsättning K och metod III–VI

**Modelluppsättning L**



**Legend**

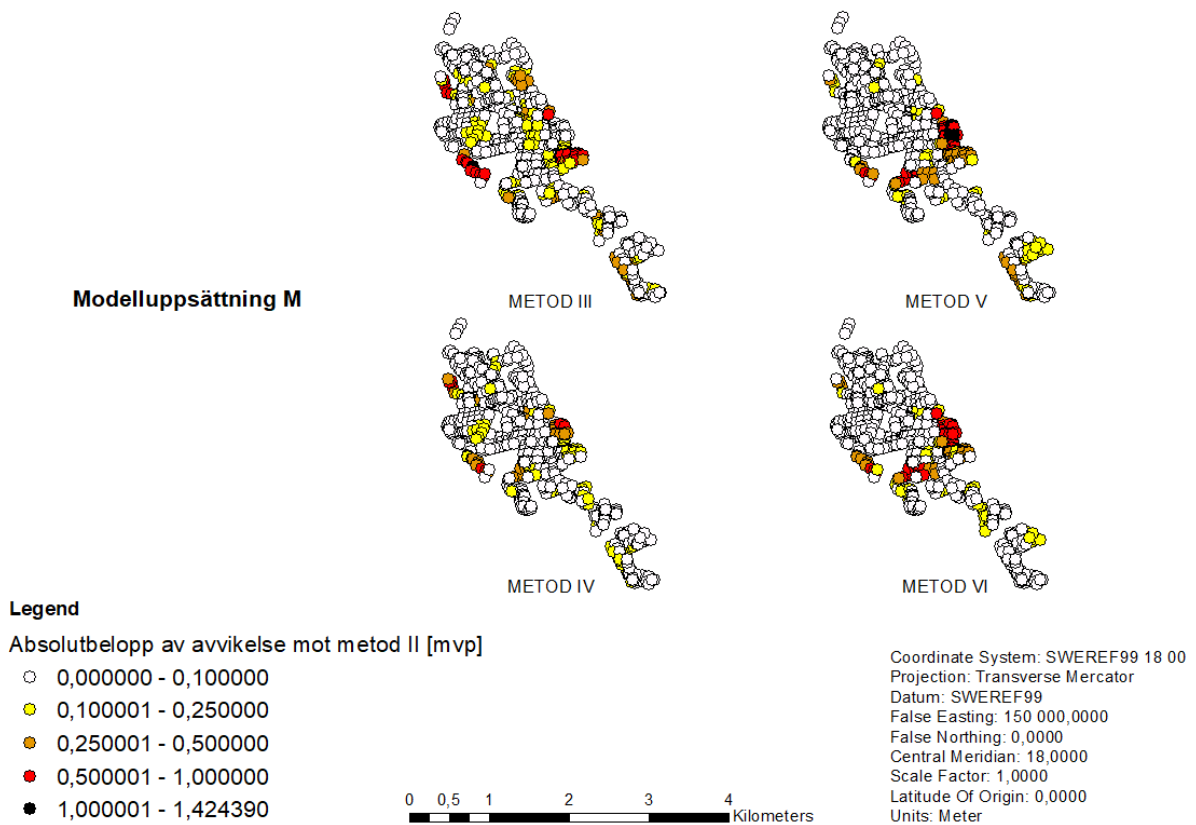
Absolutbelopp av avvikelse mot metod II [mvp]

- 0,000000 - 0,100000
- 0,100001 - 0,250000
- 0,250001 - 0,500000
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 3,819731

Coordinate System: SWEREF99 18 00  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: SWEREF99  
 False Easting: 150 000,0000  
 False Northing: 0,0000  
 Central Meridian: 18,0000  
 Scale Factor: 1,0000  
 Latitude Of Origin: 0,0000  
 Units: Meter



**Figur 28** Avvikelse mot metod II för beräknat maximalt vattendjup i modelluppsättning L och metod III–VI.



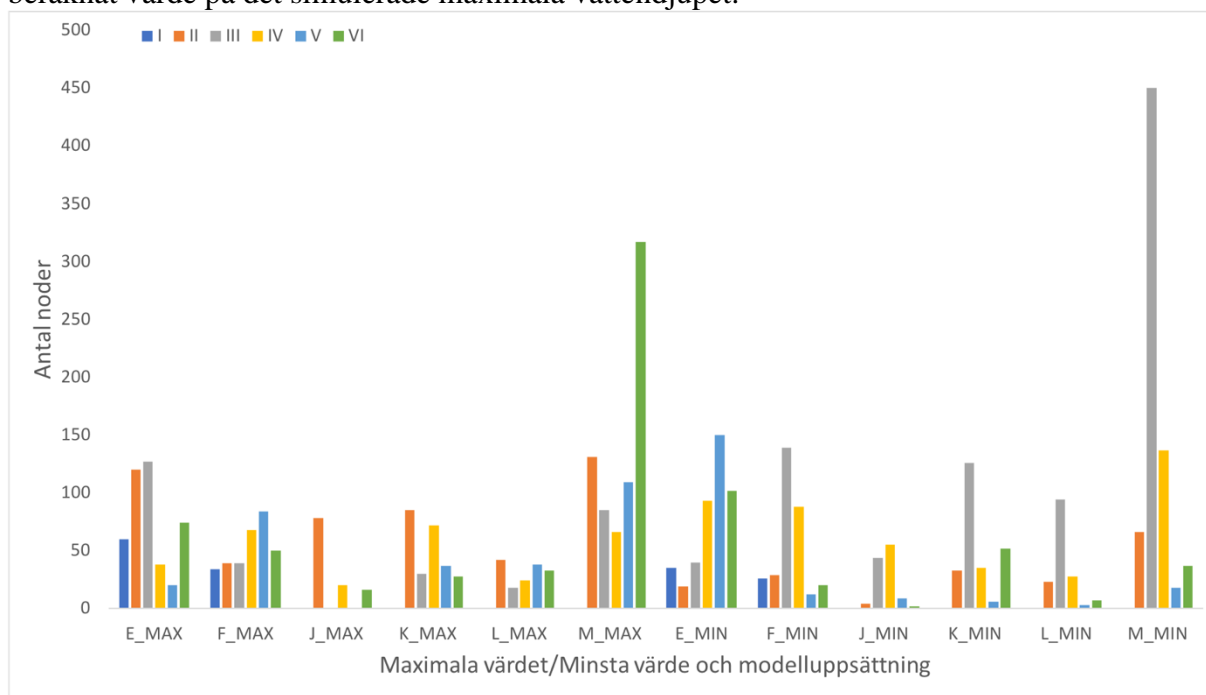
**Figur 29** Avvikelse mot metod II för beräknat maximalt vattendjup i modelluppsättning M och metod III–VI.

De enkla metoderna har generellt resulterat i färre noder där det maximala vattendjupet överstigit ledningshjässan i jämförelse med de detaljerade metoderna (Tabell 3). Detta är dock inte fallet för varje modelluppsättning och alla enkla metoder (modelluppsättning F, metod V & VI). Metod III uppvisar störst avvikelse från de detaljerade metoderna och har resulterat i flest antal noder med ett maximalt vattendjup under ledningshjässan i jämförelse med de detaljerade metoderna.

**Tabell 3** Antal nodvärden för maximalt vattendjup i relation till ledningshjässa för modelluppsättning och avgränsningsmetod I–VI. Skuggad markering innebär ett lägre antal noder än den mest detaljerade metoden per modelluppsättning.

Nivå mot ledningshjässa [mvp]	I	II	III	IV	V	VI
<i>Modelluppsättning E</i>						
≤0	152	137	162	162	162	153
0<x≤0,5	98	96	79	97	111	98
0,5<x≤1	98	97	93	91	91	94
1<x≤1,5	40	57	65	47	45	48
1,5<x≤2	42	49	37	44	29	39
2<x≤3	28	22	21	21	19	27
x≥3	26	26	27	22	27	25
<i>Modelluppsättning F</i>						
≤0	97	99	132	107	89	92
0<x≤0,5	70	60	64	70	62	71
0,5<x≤1	34	41	42	36	42	32
1<x≤1,5	52	61	43	44	50	65
1,5<x≤2	56	51	35	39	56	52
2<x≤3	28	25	22	41	38	26
x≥3	5	5	4	5	5	4
<i>Modelluppsättning J</i>						
≤0		10	17	14	14	14
0<x≤0,5		5	12	5	5	6
0,5<x≤1		12	17	22	24	22
1<x≤1,5		16	15	29	28	27
1,5<x≤2		23	20	21	20	24
2<x≤3		46	34	20	23	22
x≥3		5	2	6	3	2
<i>Modelluppsättning K</i>						
≤0		183	196	186	186	189
0<x≤0,5		23	19	25	26	23
0,5<x≤1		10	7	12	9	10
1<x≤1,5		10	9	9	9	9
1,5<x≤2		5	5	4	6	7
2<x≤3		21	20	20	20	18
x≥3		4	0	0	0	0
<i>Modelluppsättning L</i>						
≤0		141	143	141	140	140
0<x≤0,5		13	12	13	14	14
0,5<x≤1		3	2	3	3	3
1<x≤1,5		0	0	0	0	0
1,5<x≤2		0	0	0	0	0
2<x≤3		0	0	0	0	0
x≥3		0	0	0	0	0
<i>Modelluppsättning M</i>						
≤0		310	324	299	281	285
0<x≤0,5		152	150	158	151	146
0,5<x≤1		109	104	114	112	114
1<x≤1,5		81	86	87	95	101
1,5<x≤2		48	38	42	53	50
2<x≤3		14	12	14	22	18
x≥3		0	5	5	5	5

De detaljerade metoderna har resulterat i högst simulerat maximalt vattendjup i ett stort antal noder i jämförelse med de enkla metoderna (Figur 30), där de detaljerade metoderna har resulterat i flest antal noder med högst simulerat värde för tre av sex modelluppsättningar (J\_MAX, K\_MAX, L\_MAX). Metod III har resulterat i störst antal noder med ett beräknat lägsta värde för det simulerade maximala vattendjupet i fyra av sex modelluppsättningar (F\_MIN, K\_MIN, L\_MIN, M\_MIN). Även metod IV resulterade i många noder med lägst beräknat värde på det simulerade maximala vattendjupet.



**Figur 30** Antalet gånger de olika avgränsningsmetoderna resulterat i det maximala/minsta beräknade vattendjupet i varje nod i jämförelse mot övriga avgränsningsmetoder per modelluppsättning. Färgkodning indikerar avgränsningsmetod I–VI.

### 5.3 FÖRENKLAD KOSTNAD-NYTТА-ANALYS

Tidsbehovet för de enklare avgränsningsmetoderna har varit störst för den höjdmodellsbaserade metod III och minst för de Thiessenpolygon-baserade metoderna V & VI (tabell 4). Vid jämförelse av hur många fler noder som inte beräknats få dämning i jämförelse med de detaljerade metoderna har metod III gett det högsta antalet och metod VI det lägsta (tabell 5).

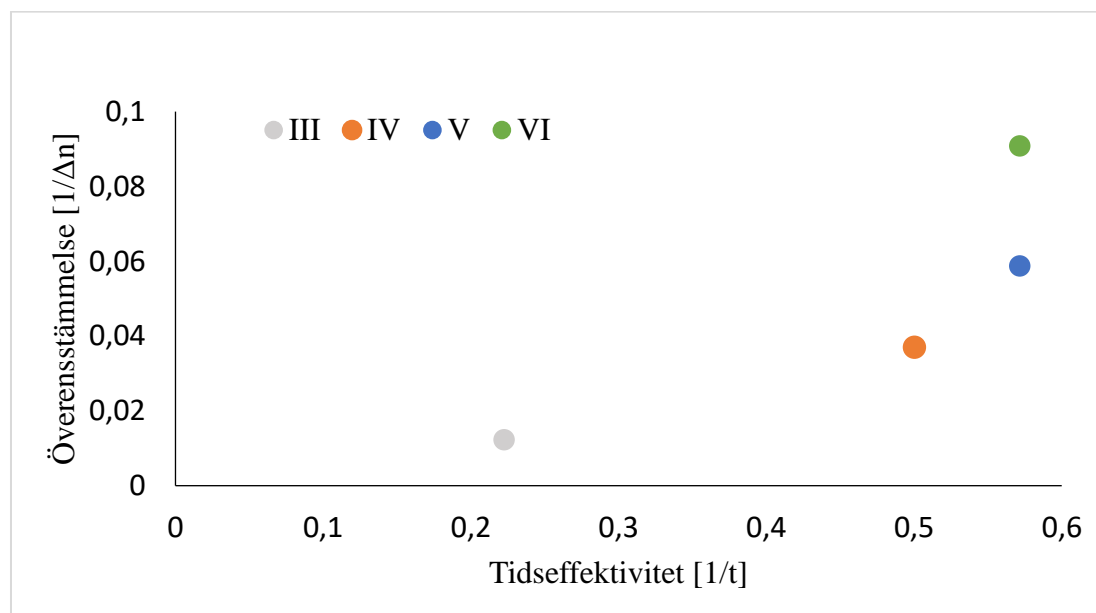
**Tabell 4** Uppskattat tidsbehov ( $t$ ) per enkel avgränsningsmetod enligt ekvation 8 efter antalet indata ( $D$ ), antal programverktyg ( $P$ ), och korrigeringsbehov ( $K$ ).

Metod	D	P	K	t [tidsenhet]
III	3	2	Stort	4,5
IV	1	2	Ingen påverkan	2
V	1	1	Befintligt	1,75
VI	1	1	Befintligt	1,75

**Tabell 5** Avvikelse i antalet dämnda nodpunkter ( $\Delta n$ ) mellan enklare avgränsningsmetoders dämnda noder ( $n$ ) och den mest detaljerade metodens antal dämnda noder ( $n_{\text{detaljerad}}$ ) summerat för alla modelluppsättningar (ekvation 9).

Metod	$\Delta n$
III	81
IV	27
V	17
VI	11

Jämförelsen av de enklare metoderna visade att metod VI, Thiessenpolygoner efter ledningar, gett störst överensstämmelse med de detaljerade metoderna och krävt minst tid (Figur 31).



**Figur 31** De enklare avgränsningsmetodernas tidsbehov och överensstämmelse med de detaljerade metoderna.



## 6. DISKUSSION

Examensarbetet har jämfört olika avgränsningsmetoder och dess inverkan på simuleringsresultat vid hydraulisk modellering av spill- och dagvattennät. Två detaljerade metoder baserade på topografiska data och fastighetsgränser jämfördes mot fyra enklare metoder baserade på endast topografiska data, topografiska data med byggnaders höjder, Thiessenpolygoner efter brunnar, och Thiessenpolygoner efter ledningar.

I studien har endast avgränsningsmetoden och tillhörande modellparametrar varierats medan alla andra förutsättningar inom 6 olika modelluppsättningar har hållits konstanta, varvid avgränsningsmetodens effekt på simuleringsresultaten studerats. Genom detta har de förenklade metoderna kunnat jämföras mot de detaljerade och visat på avgränsningsmetodens betydelse. Studien har kunnat jämföra de olika metoderna för modellområden av varierande storlek, varierande markanvändning, varierande ledningssystem, och av varierande modellerad ledningstyp. Inga empiriska data har jämförts mot simuleringsresultaten, då detta inte rymts inom studiens omfattning.

### 6.1 DELAVRINNINGSSOMRÅDEN

De olika metodernas resulterande delavrinningsområden har uppvisat skillnad i storlek, utbredning och form. De detaljerade metoderna som byggt på information om byggnaders placering, samt på de topografiska förhållandena för övriga ytor har antagits ge den bästa beskrivningen av avrinningsbildningen till ledningsnätet. För att kunna använda denna hybridmetod på modeller av olika typ (spillvatten/dagvatten) var två olika versioner av det detaljerade tillvägagångssättet tvunget att tas fram. De resulterande delavrinningsområdena blev mycket liknande (Figur 20) och har gett en hög upplösning av modellområdenas markanvändning (Figur 21).

De förenklade metoderna har resulterat i delavrinningsområden som inte lika precist fångar in enskilda byggnader, vilket resulterat i att byggnadernas bidrag till avrinningen viktats samman med annan markanvändning i större delavrinningsområden. På grund av detta har de enklare metoderna gett delavrinningsområden med något lägre andel bidragande yta (Figur 22). Metod III har gett delavrinningsområden med en större area än de andra metoderna, vilket kan vara ett tecken på att höjdmodellen inte lyckas återge de små höjdförändringarna som finns inom modellområdet. Modellområdenas topografiska förhållanden (lutning, kuperad/flack terräng) har inte undersökts inom studien, men kan antas vara flacka då detta ofta är fallet för bebyggda områden och därmed försämrar säkerheten hos topografibaserade metoder (Chen m.fl., 2011; Callow m.fl., 2007). Metod IV har gett delavrinningsområden efter modellområdets lågpunkter utan att ta hänsyn till ledningsnätet, vilket kan innebära att de delavrinningsområden som tagits fram inte speglar verkligheten på ett tillfredställande sätt. Metoderna baserade på Thiessenpolygoner (V & VI) resulterade i många liknande rektangulära avrinningsområden, som inte fångar in modellområdets bebyggelse likt de andra metoderna. Metod VI har dessutom resulterat i något fler delavrinningsområden än metod V.

### 6.2 SIMULERAT MAXIMALT VATTENDJUP

De olika avgränsningsmetoderna har resulterat i skillnader i simulerat maximalt vattendjup i modelluppsättningarnas noder, men ingen metod har gett en sådan avvikande beskrivning av modellområdet att den inte kan anses vara användbar. Det blir därför av intresse att jämföra de olika metodernas effekt på simuleringsresultaten mot varandra för att identifiera mönster och

skillnader av praktisk betydelse vid utredning av avloppsnäts funktion. I fem av sex modelluppsättningar uppvisade de enkla metoderna lägre simulerade maximala vattendjup än de detaljerade metoderna, sett till median och kvartilavstånd (E, J, K, L, M; Figur 23). Utöver detta gav metod III lägre resultat än övriga förenklade metoder i fyra av sex modelluppsättningar (Figur 23). Följaktligen uppvisar de enkla metoderna simuleringsresultat som tenderar att underskatta det maximala vattendjupet i modelluppsättningarnas noder sett till helhetsbeskrivningen av modellområdet. Att de förenklade metoderna skiljer sig i jämförelse med de detaljerade metoderna ses även då avvikelser mellan dessa metoder studeras. Alla de enkla metoderna uppvisar avvikelser över 0,1 m för alla modelluppsättningar utom modelluppsättning L (Figur 28). Avvikelser på över 0,1 m anses problematiska<sup>1</sup>, då dessa kan påverka vilka områden som bedöms vara av risk för dämning, vilket innebär att ingen enkel metod kan likställas med de detaljerade metoderna. Avvikelseerna har vid en jämförelse med ledningsnätskartor visat sig vara större och fler längre uppströms i systemet i jämförelse med de större huvudstråksledningarna närmare modellens utlopp. Detta är att vänta då noder längre uppströms i ledningsnätet får avrinning från ett färre antal delavrinningsområden än längre nedströms och således blir dessa noder mer känsliga för en förändring av delavrinningsområdenas utformning. Ett större antal avvikelser har även observerats för modelluppsättningar med högre andel bidragande yta än övriga (E, F och J; Figur 24–26). Detta är att vänta då förändringar i form på delavrinningsområdena för dessa modelluppsättningar ger större förändringar i volym avrinning till respektive nod. Övriga modelluppsättningar (K, L, M) har inte visat på lika stort antal avvikelser mellan de detaljerade och de förenklade metoderna (Figur 27–29).

De förenklade metoderna har vid jämförelse med ledningshjässor resulterat i generellt färre noder med maximalt vattendjup över ledningshjässan och färre noder med ökande vattendjup över ledningshjässan än de detaljerade metoderna (Tabell 3). Undantag finns (exempelvis för modelluppsättning M) varav resultatet inte är entydigt. Att en metod underskattar det maximala vattendjupet är mer problematiskt än att den överskattar då man vid analys riskerar att förringa riskerna med det simulerade scenariot.

Även när antalet gånger varje metod resulterat i det högsta/lägsta nodvärdet har indikationer på att de förenklade metoderna tenderar att underskatta simuleringsresultaten erhållits (Figur 30). De detaljerade metoderna har genererat förhållandevis många noder med ett högsta värde, även om resultatet inte är entydigt. Metod III sticker ut som den metod som genererat flest antal noder med ett lägsta simulerat värde på vattendjupet i fyra av sex modelluppsättningar. Alltså tenderar de förenklade metoderna att underskatta det maximala vattendjupet i modelluppsättningarnas noder och metod III ger den största underskattningen.

### 6.3 FÖRENKLAD KOSTNAD-NYTTA-ANALYS

Kostnad-nytta-analysen har ämnat placera de förenklade metoderna i förhållande till varandra med avseende på tidsåtgång och överrensstämmelse med de detaljerade metoderna, för att väga metodernas arbetsinsats mot deras betydelse för simuleringsresultaten. Avsaknaden av entydighet i hur metoderna presterat mellan modelluppsättningarna gör bedömningen av överensstämmelse med de detaljerade metoderna svår, då den varierar från ett modellområde till ett annat. Utifrån den förenklade analys som gjorts är det mer motiverat att använda metoderna baserade på Thiessenpolygoner framför metoderna baserade på topografiska data då dessa gett

---

<sup>1</sup> Linnéa Siegwán, vattenutredare, Tyréns AB. Muntligen januari 2019

bättre överensstämmelse med de detaljerade metoderna och krävt mindre tid (Figur 31). Thiessenpolygon-metoderna har trots detta genererat avvikelser över 0,1 m och större skillnader över 1 m, vilket gör att användandet av metoderna också kan ifrågasättas. Valet av avgränsningsmetod har betydelse för modelleringen och modelleringssyftet och bör därför utgå från modelleringssyftet. Är det motiverat att använda en enklare metod, med risk för osäkerheter i simuleringsresultaten, kan en Thiessenpolygon-metod väljas för att spara tid.

## 6.4 OSÄKERHETER

Avsaknaden av uppträdande av entydiga mönster mellan avgränsningsmetoderna och modelluppsättningarna gör att inga entydiga slutsatser kan dras. Den variation i simulerade maximala vattendjup som uppvisats kan därför endast ge indikationer på hur de olika metoderna förhåller sig mot varandra och till modelleringsprocessen. Avsaknaden av entydighet kan bero på att olika avgränsningsmetoder är bättre för olika typer av modellområden och avloppssystem. Områdesegenskaper som lutning och topografisk variation kan ha haft betydelse för de observerade skillnaderna mellan avgränsningsmetoderna. Det kan tänkas att större skillnader mellan de topografibaserade avgränsningsmetoderna i jämförelse mot Thiessenpolygoner är att vänta för modellområden med stor lutning och kuperad terräng. Beroenden mellan modellkomponenter, modellparametrar, och gränsvärden bidrar till svårkvantifierade osäkerheter i modeller (Pappenberger & Beven, 2006), och kan också ha påverkat avsaknaden av entydiga mönster. Det går därmed inte att med säkerhet säga att de skillnader som erhållits mellan de olika metoderna inte beror av inneboende osäkerheten i modellen som påverkats av att modellparametrar ändrats, eller att modellområdenas egenskaper har påverkat hur avgränsningsmetoderna presterat. I kontrast till detta kvarstår faktumet att de olika metodvalen resulterar i praktiska implikationer vid utredning av avloppssystemet. Med detta i åtanke är det av vikt att vid kommunikation av simuleringsresultaten tydliggöra metodvalens och modellens tillkortakommanden, samt att sätta dessa i relation till andra modellparametrar, så att även de som inte arbetat med modelluppsättningen kan dra välgrundade slutsatser av resultaten.

Vid avrinningssimuleringen med tid-area-metoden har varje delavrinningsområde beskrivits som rektangulärt. Detta stämmer inte för merparten av de framtagna delavrinningsområdena, speciellt inte för de höjdmodellsbaserade metoderna som resulterat i många delavrinningsområden med oregelbundna former. Tid-area-metoden lämpar sig dessutom bäst för mindre delavrinningsområden, där koncentrationstider på över ett par minuter innebär att metoden blir allt mer en approximation (Arnell, 1980). Då många av delavrinningsområdena har en större koncentrationstid än ett par minuter, utöver de extra 5 som kompenserar för avrinningens uppehåll i serviser, stuprör eller liknande (ekvation 7), i kombination med oregelbundet formade delavrinningsområden kommer metoderna att vid anpassning till fysikaliska förhållanden troligtvis att kräva kalibrering av andelen bidragande yta.

## 6.5 PRAKTISKA IMPLIKATIONER OCH FRAMTIDA STUDIER

De förenklade metoderna underskattar det maximala simulerade vattendjupen i modelluppsättningarnas noder och riskerar att resultera i att ett lägre antal noder identifieras vara i risk för dämning än vad detaljerade metoder beräknar. Då avvikelserna ökat med ökad andel bidragande yta är det mer motiverat att använda en förenklad avgränsningsmetod för modelluppsättningar över spillvattenmodeller i förortsområden, medan detaljerade metoder bör användas för modeller med större regnpåverkan. Utöver detta har osäkerheten i simuleringsresultaten till följd av avgränsningsmetoden ökat uppströms i ledningsnätet.

Studien har begränsats till att innefatta en teoretisk jämförelse av sex olika avgränsningsmetoder på sex olika modelluppsättningar. Det kan vara av intresse att undersöka andra alternativa avgränsningsmetoder samt att sätta dessa i relation till empiriska data för att stärka kopplingen mellan teori och fysikalisk verklighet. För vidare studier skulle det vara av intresse att undersöka hur olika modellområdesegenskaper som exempelvis modellområdets lutning påverkar avgränsningsmetodens effekt på simuleringsresultaten. Slutligen föreslås en undersökning av hur mycket kalibreringsbehovet varierar mellan olika metoder att vara av intresse för att bättre kunna utvärdera metodvalets påverkan på hela utredningsarbetets tidsbehov.

## 7. SLUTSATSER

De framtagna avgränsningsmetoderna har resulterat i skillnader i simulerat högsta vattendjup i modelluppsättningarnas noder. Avvikelserna i simuleringsresultaten är så stora ( $>0,1$  m) att de anses få praktisk betydelse. Skillnaderna mellan avgränsningsmetoderna uppvisar inga entydiga mönster mellan modelluppsättningarna och kan därför inte uteslutas att bero av modellområdets egenskaper eller modellens inneboende osäkerheter. Följande slutsatser dras från studien:

- ❖ Modellområdet kan avgränsas efter topografiska data, efter avstånd till fastighetsgränser, ledningar och brunnar. Beroende av vilken avgränsningsmetod som används erhålls delavrinningsområden av olika storlek och utformning vilket påverkar volymen avrinning som når olika delar av ledningsnätet vid olika tidpunkter under simuleringsperioden.
- ❖ Valet av avgränsningsmetod ger upphov till skillnader som överstiger 0,1 m i simulerat maximalt vattendjup i modelluppsättningars noder. Dessa skillnader är av praktisk betydelse då de kan medföra att valet av avgränsningsmetod påverkar vilka delar av systemet som däms. Därav antyder resultaten att valet av avgränsningsmetod är av betydelse för modelleringsprocessen och erhållna resultat.
- ❖ De förenklade metoderna underskattar maximalt simulerat vattendjup i modelluppsättningens noder i jämförelse med de detaljerade metoderna. De höjdmodellsbaserade metoderna underskattar simulerade värden mer än metoder baserade på Thiessenpolygoner.
- ❖ De enkla metoderna baserade på Thiessenpolygoner har krävt minst tid och resulterat i störst överensstämmelse med de detaljerade metoderna.

Utöver dessa slutsatser har resultaten indikerat att modellområdets egenskaper får betydelse för hur mycket avgränsningsmetoden påverkar simuleringsresultaten. Skillnaden i simuleringsresultaten mellan de olika avgränsningsmetoderna har varierat mellan de olika modelluppsättningarna, vilket tros kunna förklaras av modellområdenas varierande typ av markanvändning och av deras lutningsförhållanden. För modelluppsättningarna med större regnpåverkan (dagvattenförande modelluppsättningar) och större andel bidragande yta har fler och större skillnader observerats, i förhållande till modelluppsättningar med lägre regnpåverkan (spillvattenförande modelluppsättningar) i områden med lägre andel bidragande yta. Utöver detta har fler skillnader funnits längre uppströms i ledningsnätet jämfört med närmare modelluppsättningarnas utlopp.

## REFERENSER

- Arnell, V. (1980). *Dimensionering och analys av dagvattensystem - Val av beräkningsmetod*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola, geohydrologiska forskningsgruppen, s. 56.
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Hoboken, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated. Hämtad från: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/uu/detail.action?docID=822562>. [2018-10-03].
- Blomqvist, D., Hammarlund, H., Härle, P. & Karlsson, S. (2016). *Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem*. Svenskt Vatten AB. (2016–15).
- Callow, J. N., Van Niel, K. P. & Boggs, G. S. (2007). How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *Journal of Hydrology*, 332(1), s. 30-39.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill. (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering).
- Dahlström, B. (2010). *Regnintensitet - En molnfysikalisk betraktelse*. Svenskt Vatten. (2010–05).
- DHI (2017a). Collection System Modelling of storm water drainage networks and sewer collection systems. Hämtad från: <http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/CollectionSystem.pdf>. [2018-09-24].
- DHI (2017b). MOUSE Pipeflow, Reference Manual. MIKE. Hämtad från: <http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/MOUSEPipeFlowReference.pdf>. [2018-09-24].
- DHI (2017c). MOUSE Runoff Reference Manual. Hämtad från: <http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/MOUSERunoffReference.pdf>. [2018-09-24].
- ESRI (2018). Flow Direction. Hämtad från: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/flow-direction.htm>. [2018-10-03]
- Fletcher, T. D., Andrieu, H. & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, s. 261–279.
- Goonetilleke, A., Egodawatta, P. & Liu, A. (2015). *Role of Rainfall and Catchment Characteristics on Urban Stormwater Quality*. Springer Verlag. (SpringerBriefs in Water Science and Technology). ISBN 978-981-287-458-0.

- Gomez Fernandez, E. (2007). Thiessen polygons (also called a Voronoi diagram or Dirichlet tessellation). Own work, CC BY-SA 3.0. Hämtad från: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3083370>. [2018-10-11]
- Grip, H. & Rodhe, A. (2016). *Vattnets väg från regn till bäck*. Uppsala universitet, Luft-, vatten och landskapslära. ISBN 978-91-639-0456-1.
- Han, D. & Bray, M. (2006). Automated Thiessen polygon generation. *Water Resources Research*, vol. 42, no. 11, s. W11502(5).
- Jankowfsky, S., Branger, F., Braud, I., Gironás, J. & Rodriguez, F. (2013). Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments: application to the Chaudanne catchment, France: Comparison of suburban catchment and network delineation approaches. *Hydrological Processes*, 27(25), s. 3747–3761.
- Jenson, S. K. & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, no. 11, s.1593-1600.
- Kayembe, A. & Mitchell, C. P. J. (2018). Determination of subcatchment and watershed boundaries in a complex and highly urbanized landscape. *Hydrological Processes*, 32(18), s. 2845–2855.
- Lantmäteriet. (2016). Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+. Dokumentversion 2.3. Hämtad från: [https://www.lantmateriet.se/globaladdets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/hojd2\\_plus.pdf](https://www.lantmateriet.se/globaladdets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/hojd2_plus.pdf). [2019-01-20]
- Marsalek, J. & Watt, W. E. (1984). Design storms for urban drainage design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 11(3), s. 574–584.
- Mayhew, S. (2015). *Oxford dictionary of geography*. 5 ed. Oxford: Oxford University Press. (Oxford quick reference; Oxford quick reference.). ISBN 978-0-19-176103-4.
- Nationalencyklopedin. *dagvatten*. [online] (2018a). Hämtad från: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/dagvatten>. [2018-09-18].
- Nationalencyklopedin. *spillvatten*. [online] (2018b). Hämtad från: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/spillvatten>. [2018-09-18].
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K. (1994). Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, 263(5147), s. 641–646.

- Pappenberger, F. & Beven, K.J. (2006). ” Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis”, *Water Resources Research*, vol. 42, s.1-8.
- Rodriguez, F., Andrieu, H. & Creutin, J.-D. (2003). Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology*, 283(1), s. 146–168.
- ScalgoApS (2019). *About Us*. Hämtad från: <http://scalgo.com/en-US/about>. [2019-01-31]
- SMHI (2018). *Återkomsttider*. Hämtad från: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/aterkomsttider-1.89085>. [2019-01-13].
- Svenskt Vatten (2016). *Avledning av dag-, drän- och spillvatten*. Stockholm: Svenskt Vatten AB. (P110).
- Svenskt Vatten (2018). *Rekommendationer för redovisning av modellutredningar för avloppsledningsnät*. (Svenskt Vatten). Hämtad från: <http://www.svensktvatten.se/forskning/svenskt-vatten-utveckling/pagaende-svu-projekt/rekommendationer-for-redovisning-av-modellutredningar-for-avloppsledningsnat/>. [2018-08-18].
- Vaze, J., Teng, J. & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(10), s. 1086–1098.
- Yang, P., Ames, D. P., Fonseca, A., Anderson, D., Shrestha, R., Glenn, N. F. & Cao, Y. (2014). What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results? *Environmental Modelling & Software*, 58, pp 48–57.
- Zhang, H. P., Hao, C. X., Yang, G. L. & Ma, D. M. (2014). Research on Stormwater Catchments Delineation in Urban Area Based on DEM. *Advanced Materials Research*, 955–959, s. 3314–3317.
- Zhang, W. & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), s. 1019–1028.



## BILAGOR

### BILAGA A: DATA

*Tabell A1 Beskrivning av modelluppsättningarnas olika filer och data.*

Filtyp	Format	Attribut	Källa
Modelluppsättning i MIKE URBAN	(.mup/.dbg)	-	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken
Ledningsnät	Shape-fil (.shp)	Koordinater, identifieringsnummer, objekt ID, MIKE URBAN ID, typklassning (dagvatten/spillvatten), toppläge på ledning, bottenläge för ledning, längd, diameter, bredd, höjd, material, startnod, slutnod.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken
Serviser	Shape-fil (.shp)	Koordinater, identifieringsnummer, objekt ID, MIKE URBAN ID, typklassning (dagvatten/spillvatten), toppläge på ledning, bottenläge för ledning, längd, diameter, bredd, höjd, material.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken
Brunnar	Shape-fil (.shp)	Koordinater, identifieringsnummer, objekt ID, MIKE URBAN ID, byggnadsår, brunnstyp, material, diameter, höjd.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken
Avgränsat avrinningsområde (original)	Shape-fil (.shp)	Koordinater, identifikationsnummer, objekt ID, MIKE URBAN ID, områdesklassning, längd, ledningsnätstyp (kombinerat/separerat), andel bidragande yta, koncentrationstid, tid-area-koefficient, tid-area-kurva.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken

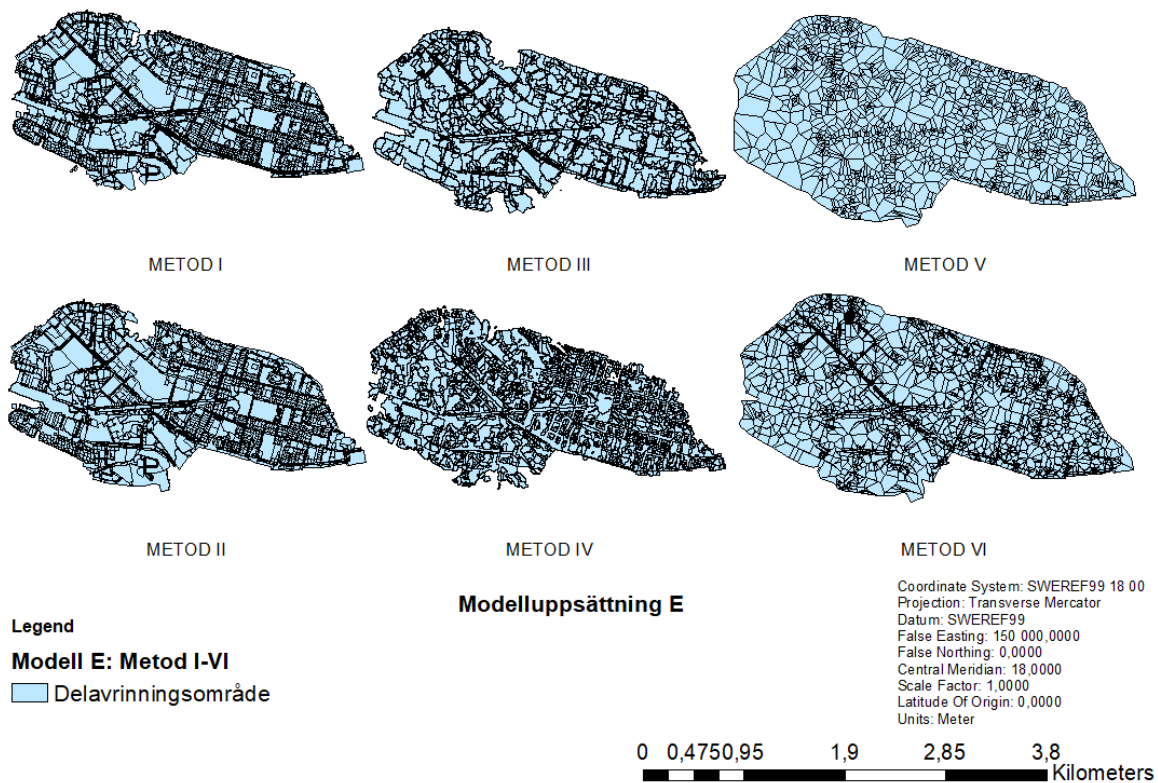
Höjdmodell (2 m)	Raster-fil (.tif)	Koordinater, markhöjder.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken (ursprung: Lantmäteriet)
Fastigheter	Shape-fil (.shp)	Koordinater, fastighetsgränser	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken (ursprung: Lantmäteriet)
Gatunät	Shape-fil (.shp)	Koordinater, gatunät.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken (ursprung: Lantmäteriet)
Ortofoto	Raster-fil (.tif)	Flygfoto.	Lantmäteriet
Taktytor	Shape-fil (.shp)	Koordinater, tak.	Stockholm Vatten, Sundbyberg vatten och avfall, Göteborg Stad och Tekniska verken

## BILAGA B: VERKTYG FÖR BEHANDLING I ArcGIS

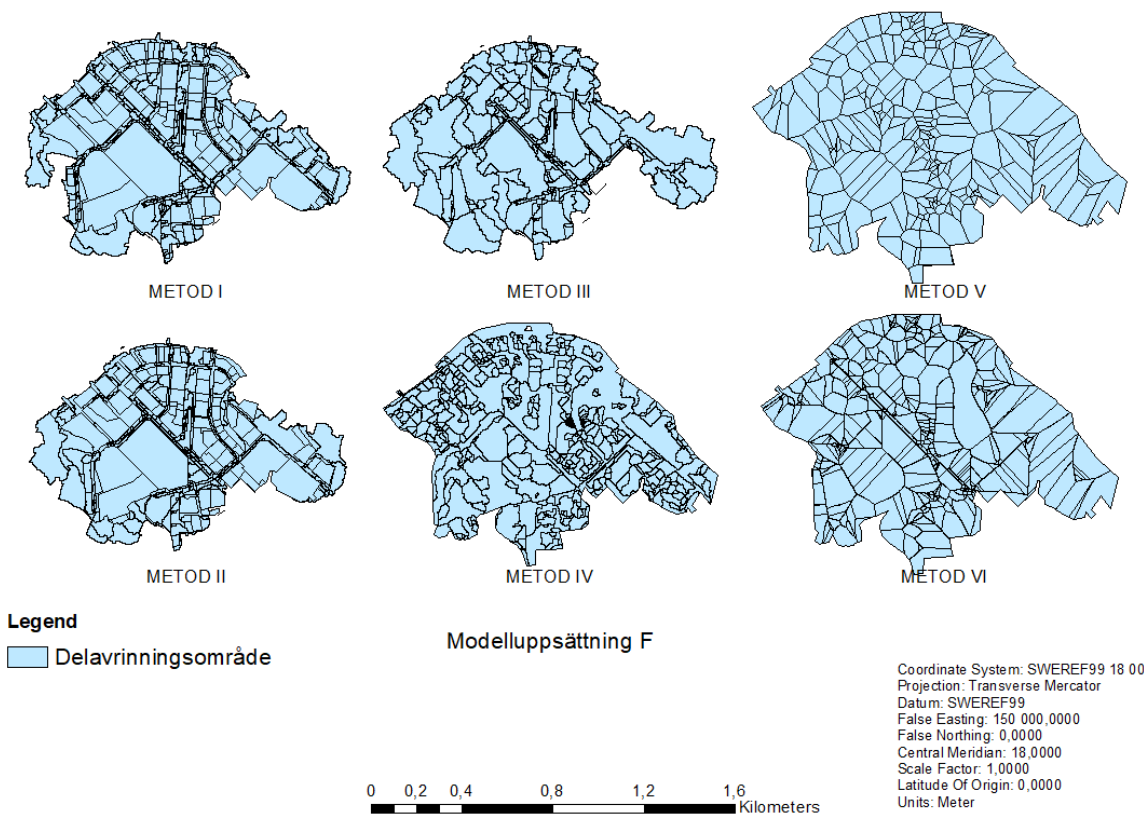
*Tabell B1* Beskrivning av Arc-GIS-verktyg som använts för behandling av geografisk information.

Behandling	Verktyg	Verktygslåda (toolbox)
Subtrahering av shape-filer	ERASE	Spatial Analyst
Addering av shape-filer	MERGE	Spatial Analyst
Modifiering av polygon	EDIT VERTICES	Editor
Klippa polygon	CUT POLYGON	Editor
DEM rekonditionering	DEM RECONDITIONING	ArcHydro
Formatering av filformat från polygon till raster	POLYGON TO RASTER	Spatial Analyst
Nedbränning av shape-fil i DEM	DEM RECONDITION	ArcHydro
Addering av raster-filer	MOSAIC TO NEW RASTER	Spatial Analyst
Subtrahering av raster-filer	RASTER CALCULATOR	Spatial Analyst
Projecering av koordinatsystem	PROJECT	Spatial Analyst
Skapa en buffert-polygon kring punkter	BUFFER	Data Management
Geografisk matchning	SPATIAL JOIN	Spatial Analyst

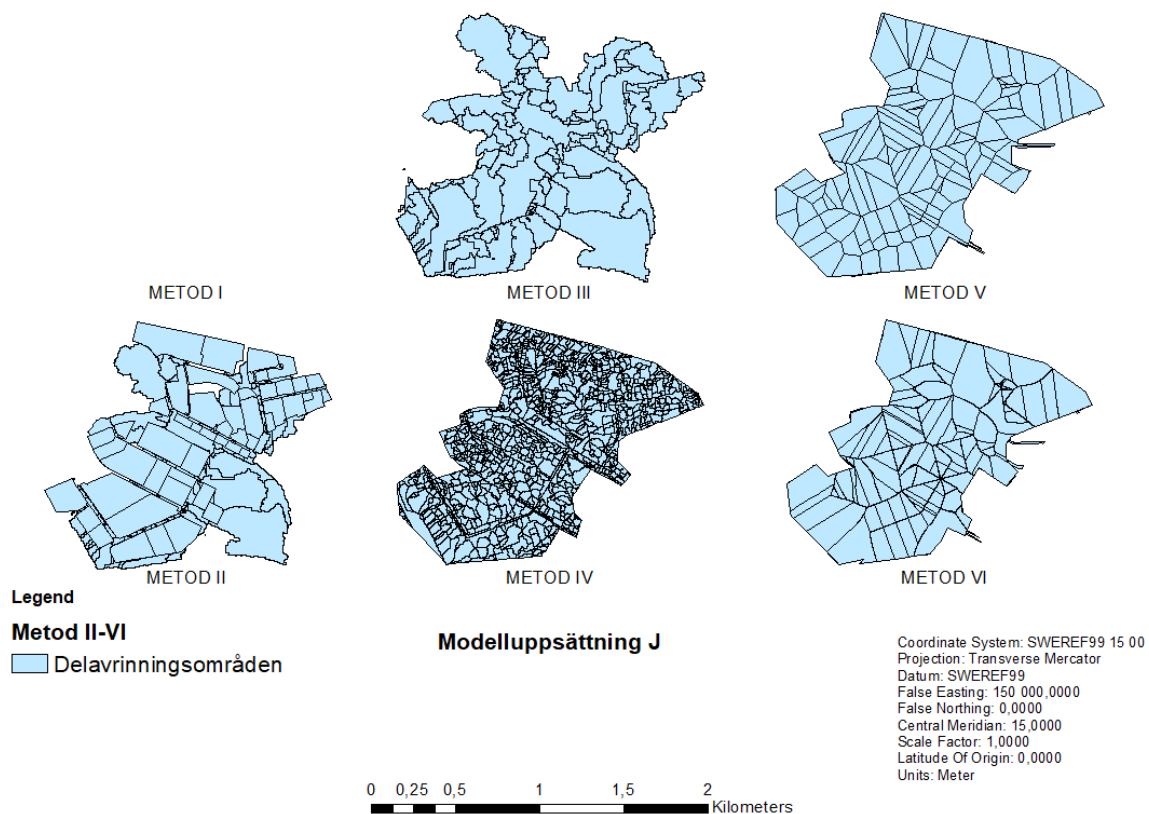
## BILAGA C: DELAVRINNINGSOMRÅDEN



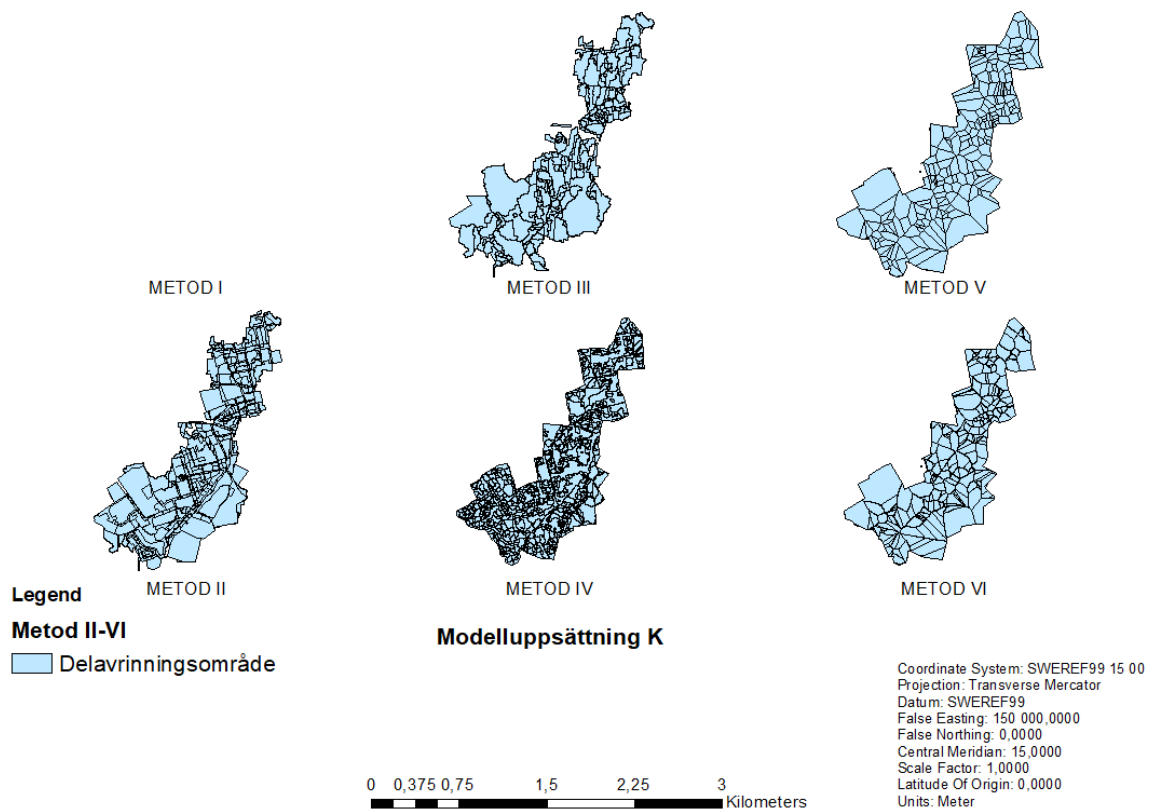
*Figur C1 Delavrinningsområden för modellupsättning E framtagna med avgränsningsmetod I-VI.*



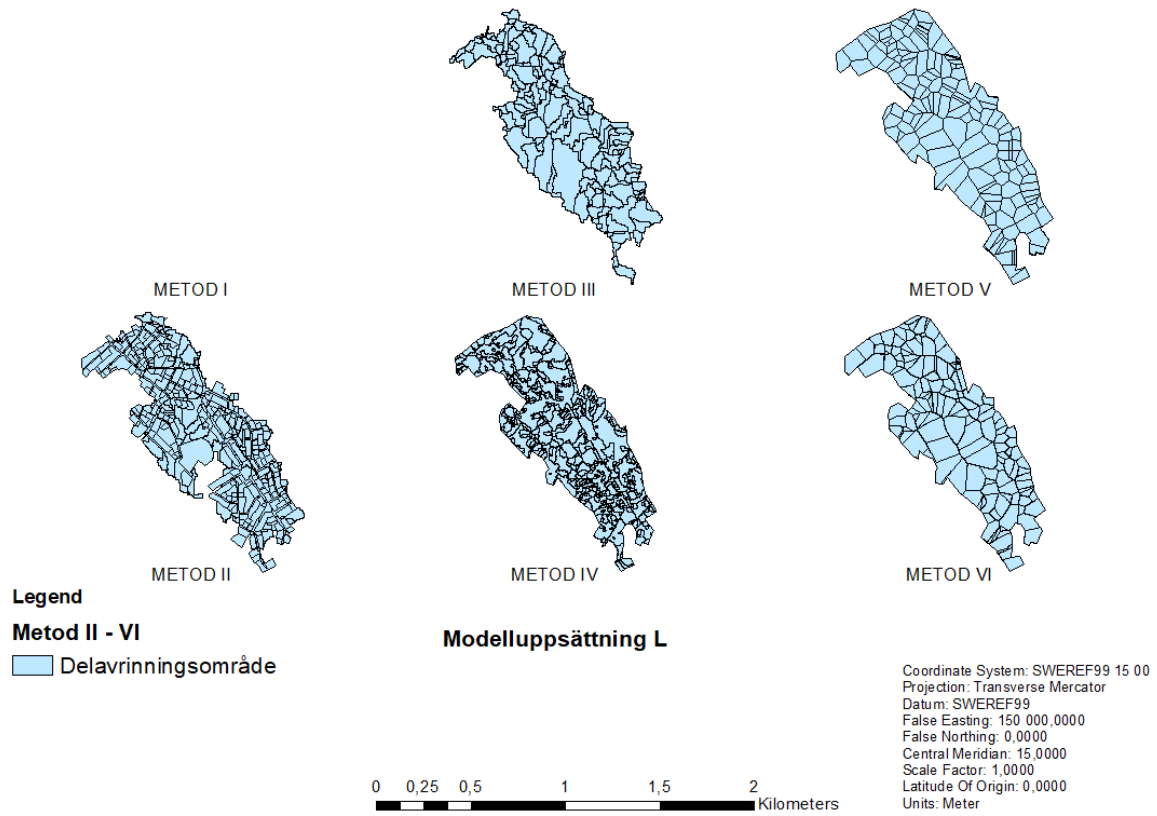
*Figur C2 Delavrinningsområden för modellupsättning F framtagna med avgränsningsmetod I-VI.*



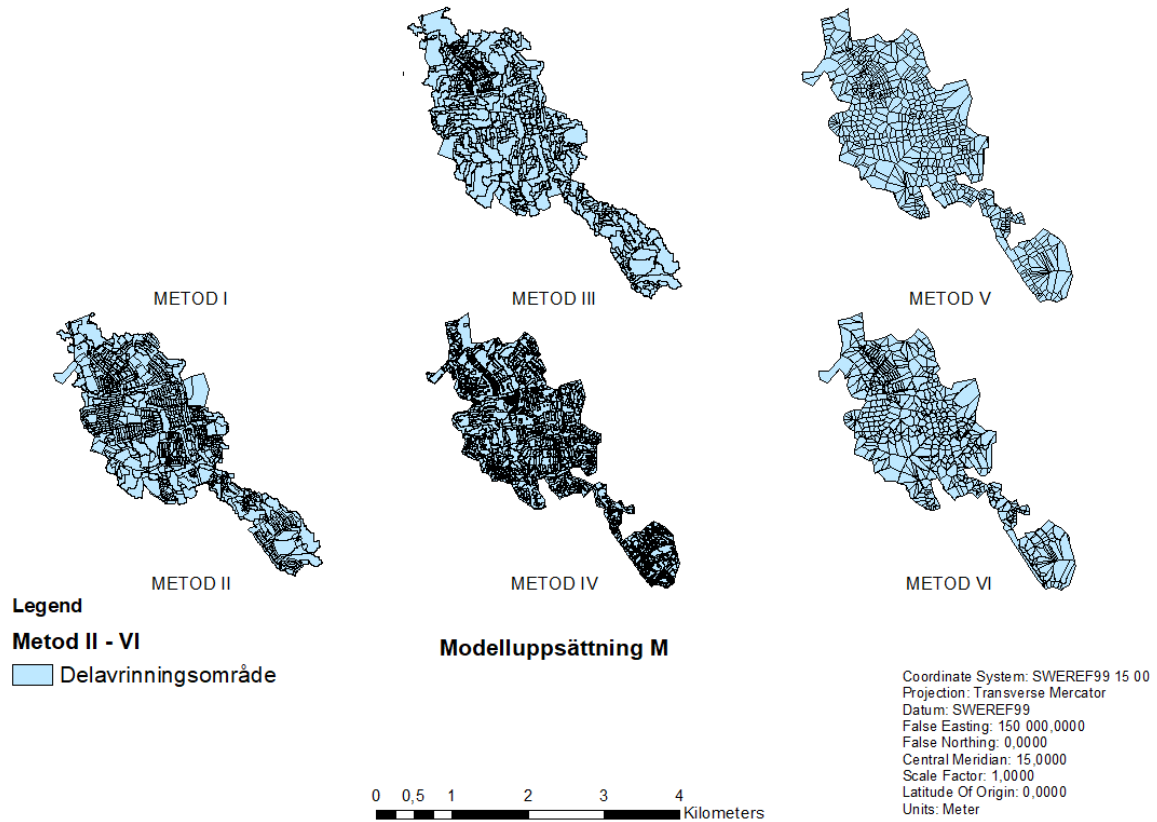
*Figur C3 Delavrinningsområden för modelluppsättning J framtagna med avgränsningsmetod II-VI.*



*Figur C4 Delavrinningsområden för modelluppsättning K framtagna med avgränsningsmetod II-VI.*

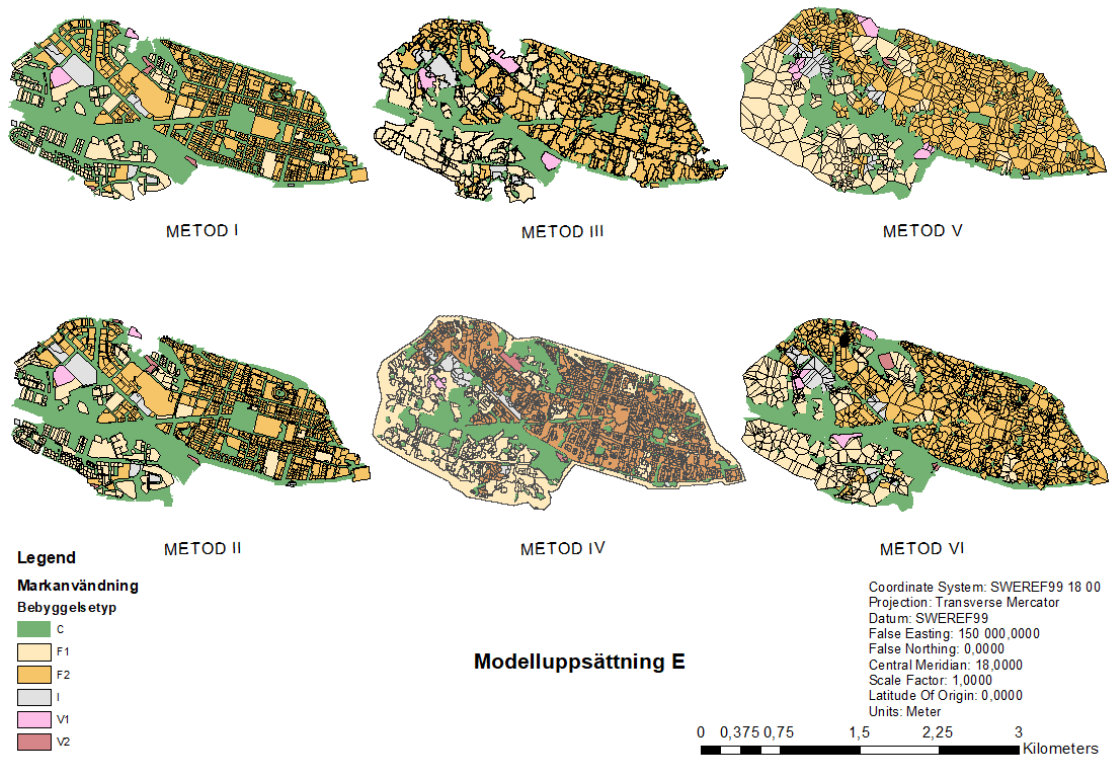


*Figur C5 Delavrinningsområden för modelluppsättning L framtagna med avgränsningsmetod II-VI.*

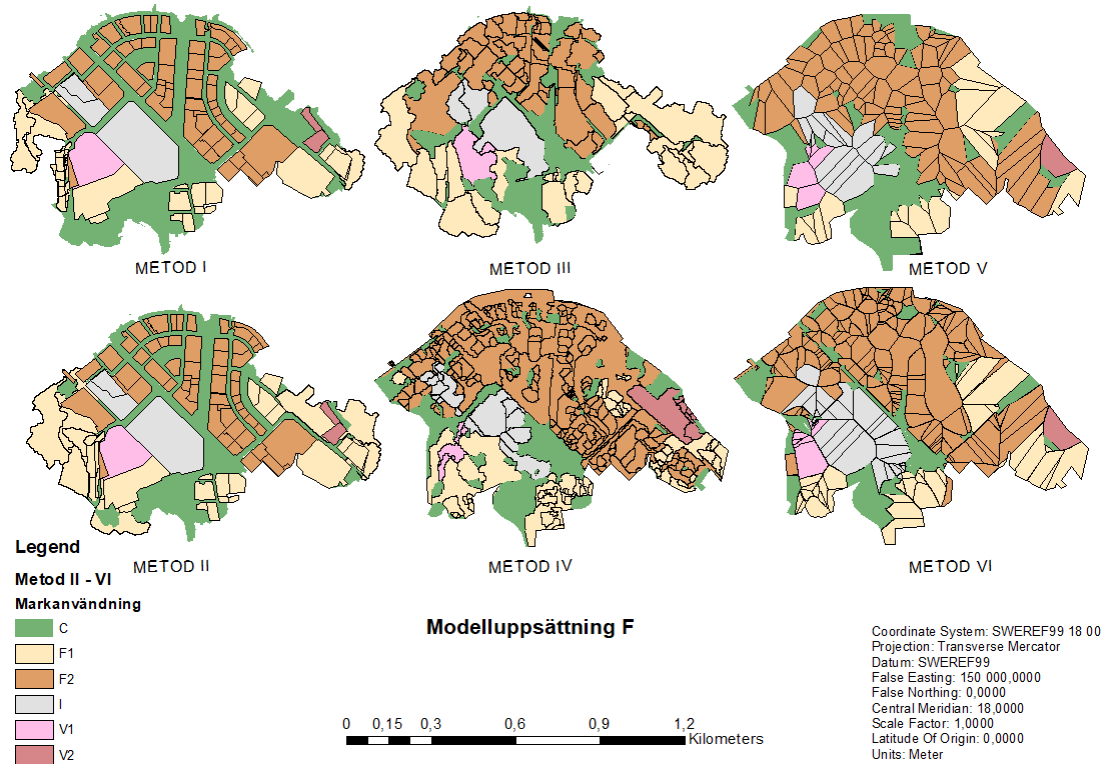


*Figur C6 Delavrinningsområden för modelluppsättning M framtagna med avgränsningsmetod II-VI.*

## BILAGA D: MARKANVÄNDNING

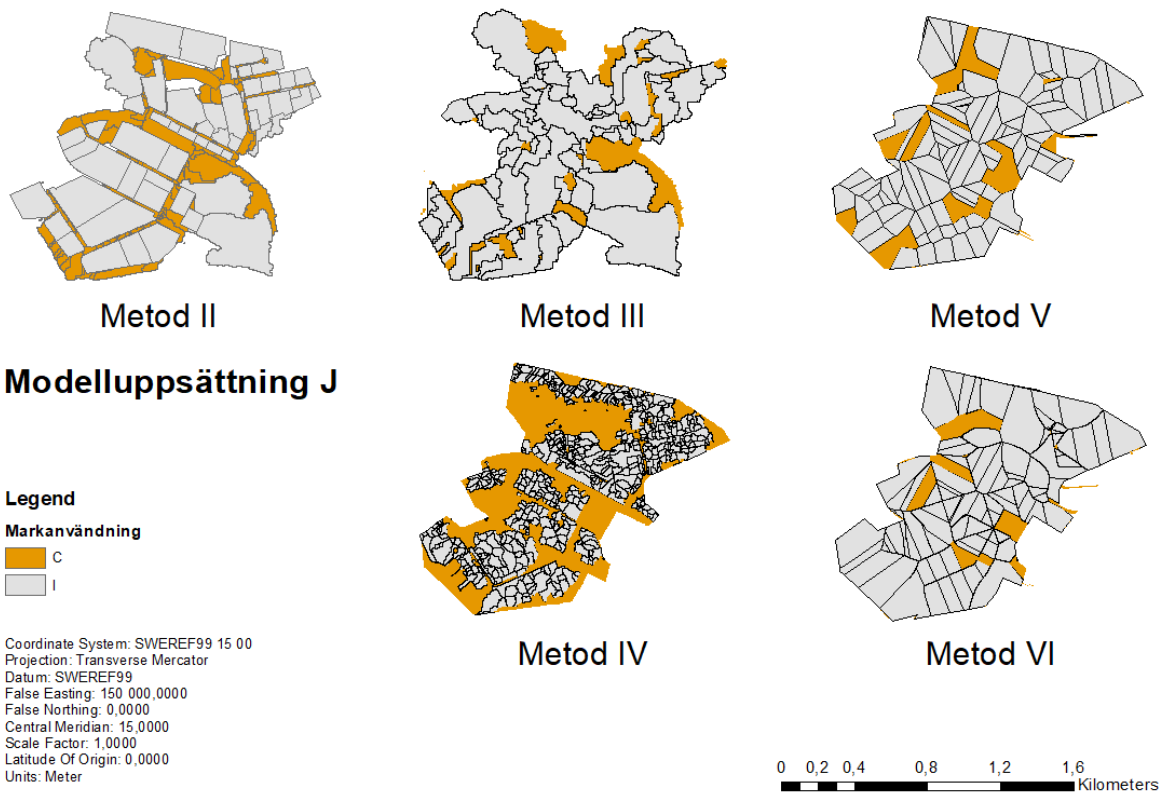


**Figur D1** Delavrinningsområden klassificerade efter markanvändning enligt tabell 2 för modelluppsättning E och avgränsningsmetod I-VI.

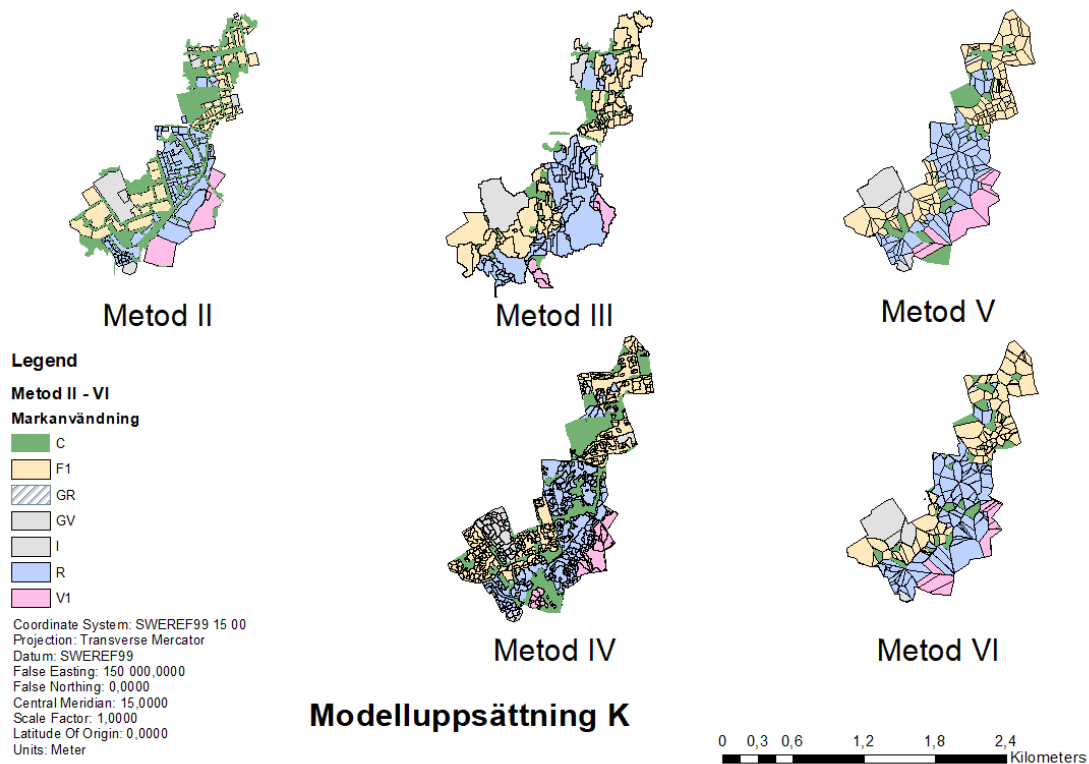


**Figur D2** Delavrinningsområden klassificerade efter markanvändning enligt tabell 2 för modelluppsättning F och avgränsningsmetod I-VI.

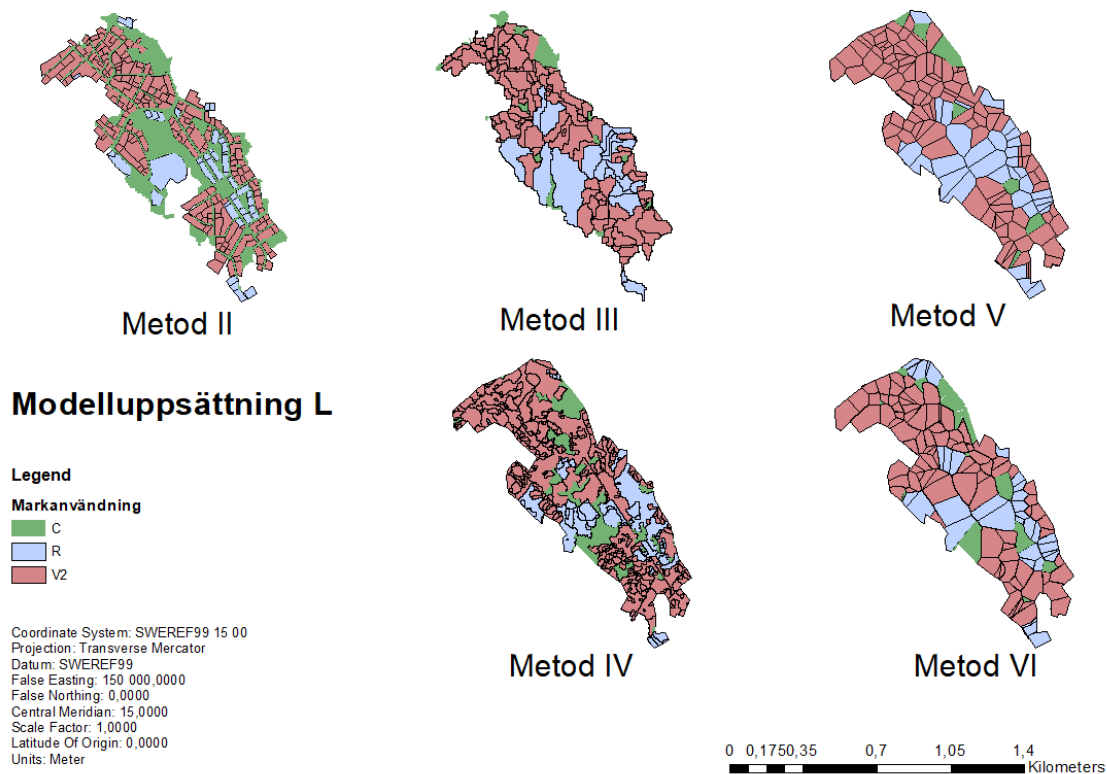




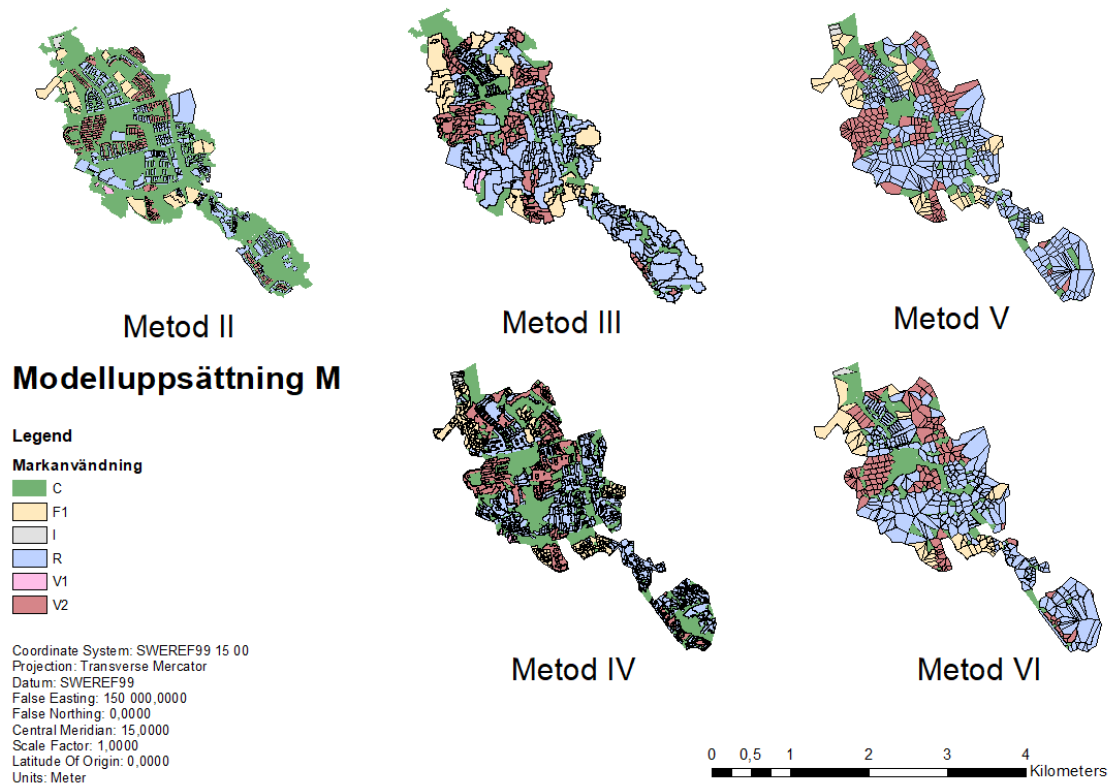
**Figur D3** Delavrinningsområden klassificerade efter markanvändning enligt tabell 2 för modelluppsättning J och avgränsningsmetod II-VI.



**Figur D4** Delavrinningsområden klassificerade efter markanvändning enligt tabell 2 för modelluppsättning K och avgränsningsmetod II-VI.



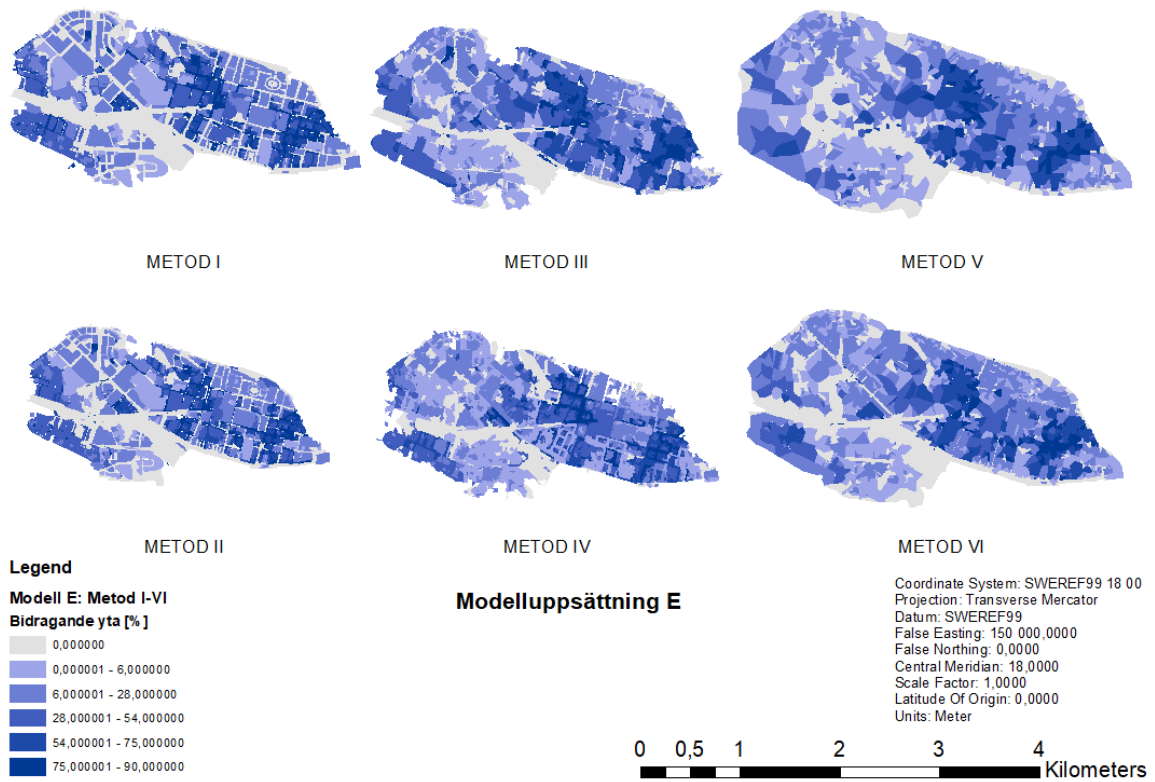
**Figur D5** Delavrinningsområden klassificerade efter markanvändning enligt tabell 2 för modelluppställning L och avgränsningsmetod II-VI.



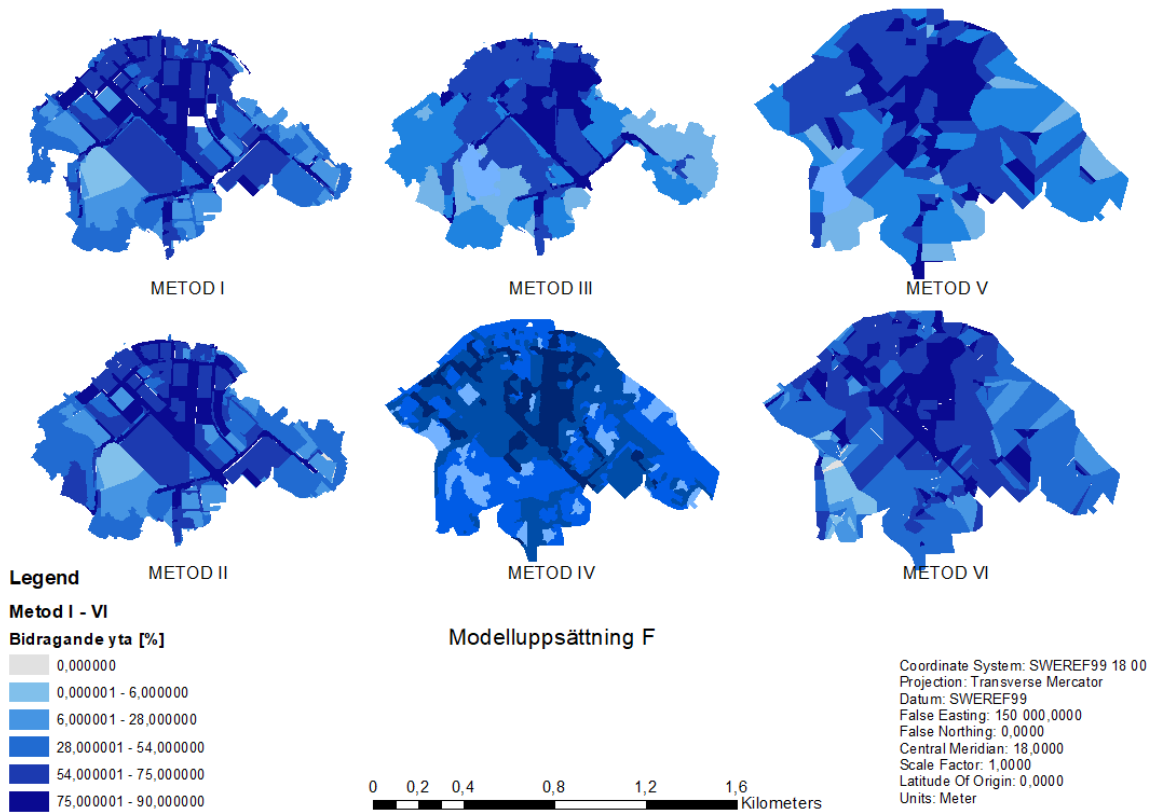
**Figur D6** Delavrinningsområden klassificerade efter markanvändning enligt tabell 2 för modelluppställning M och avgränsningsmetod II-VI.



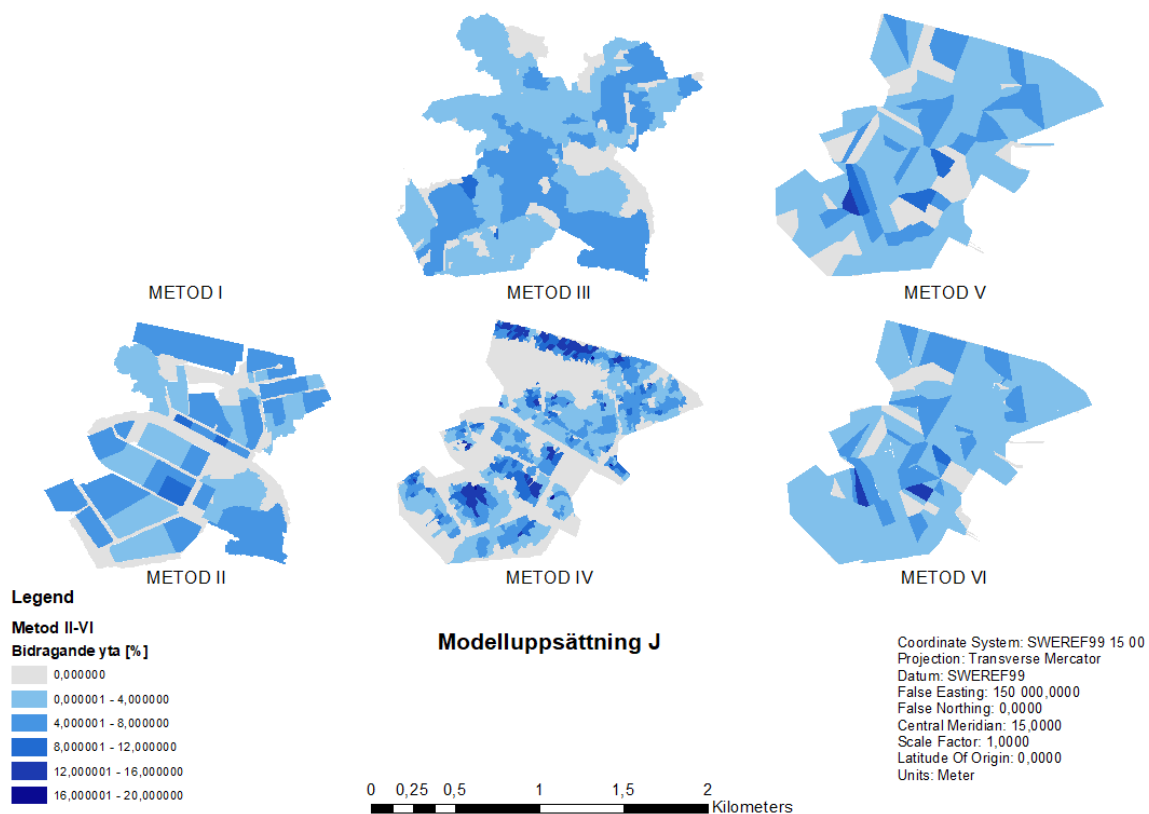
## BILAGA E: ANDEL BIDRAGANDE YTA



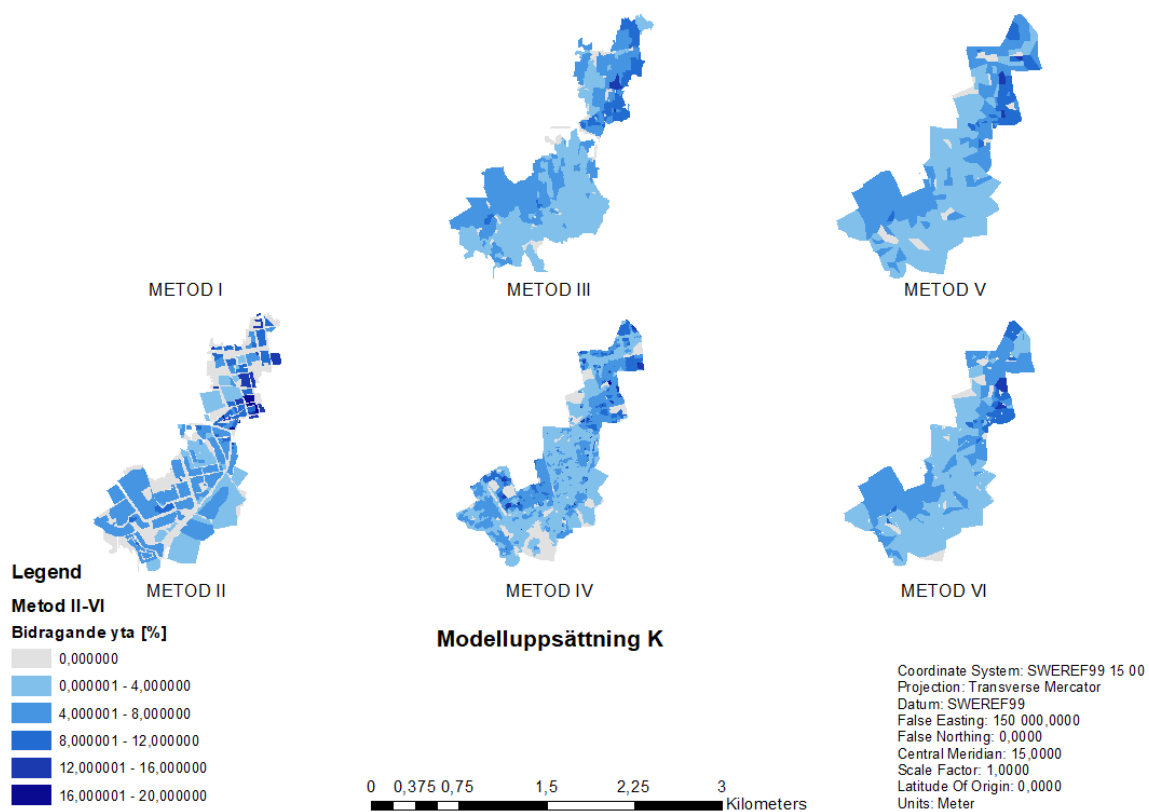
**Figur E1** Andel bidragande yta per delavrinnsområden inom modelluppställning E för avgränsningsmetod I-VI.



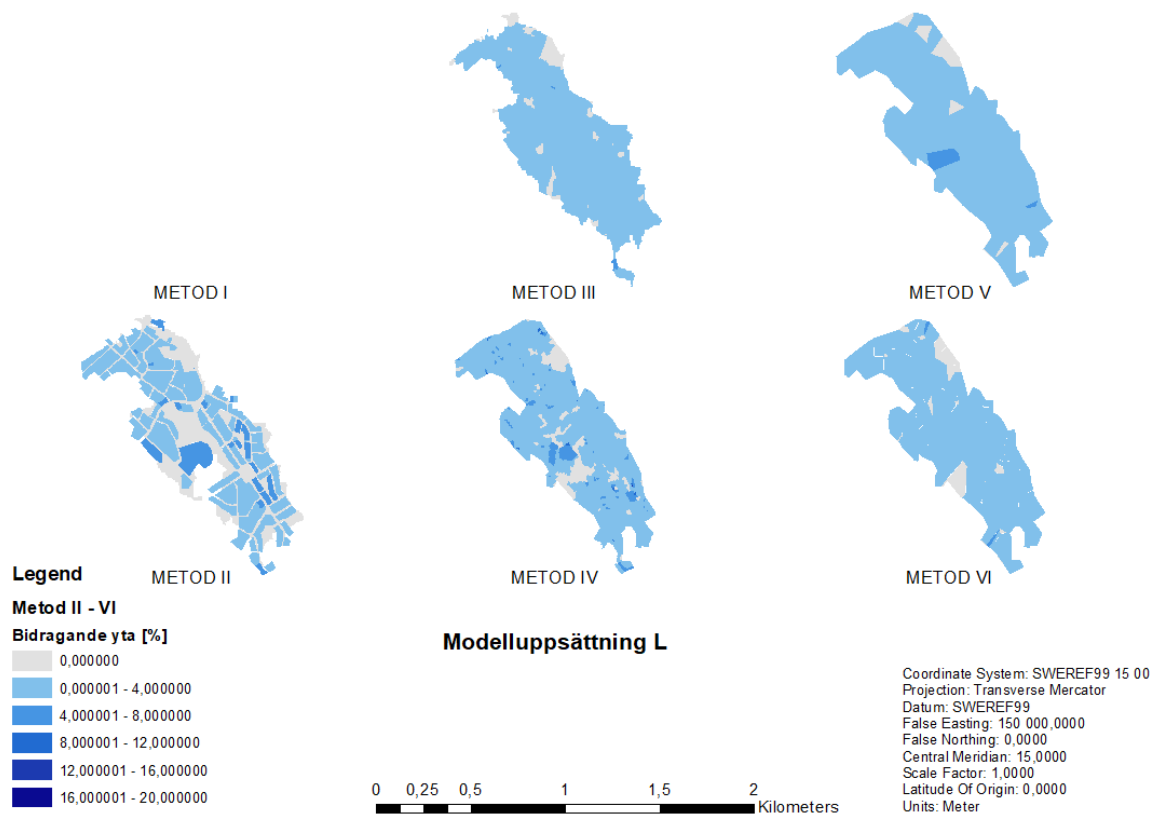
**Figur E2** Andel bidragande yta per delavrinnsområden inom modelluppställning F för avgränsningsmetod I-VI.



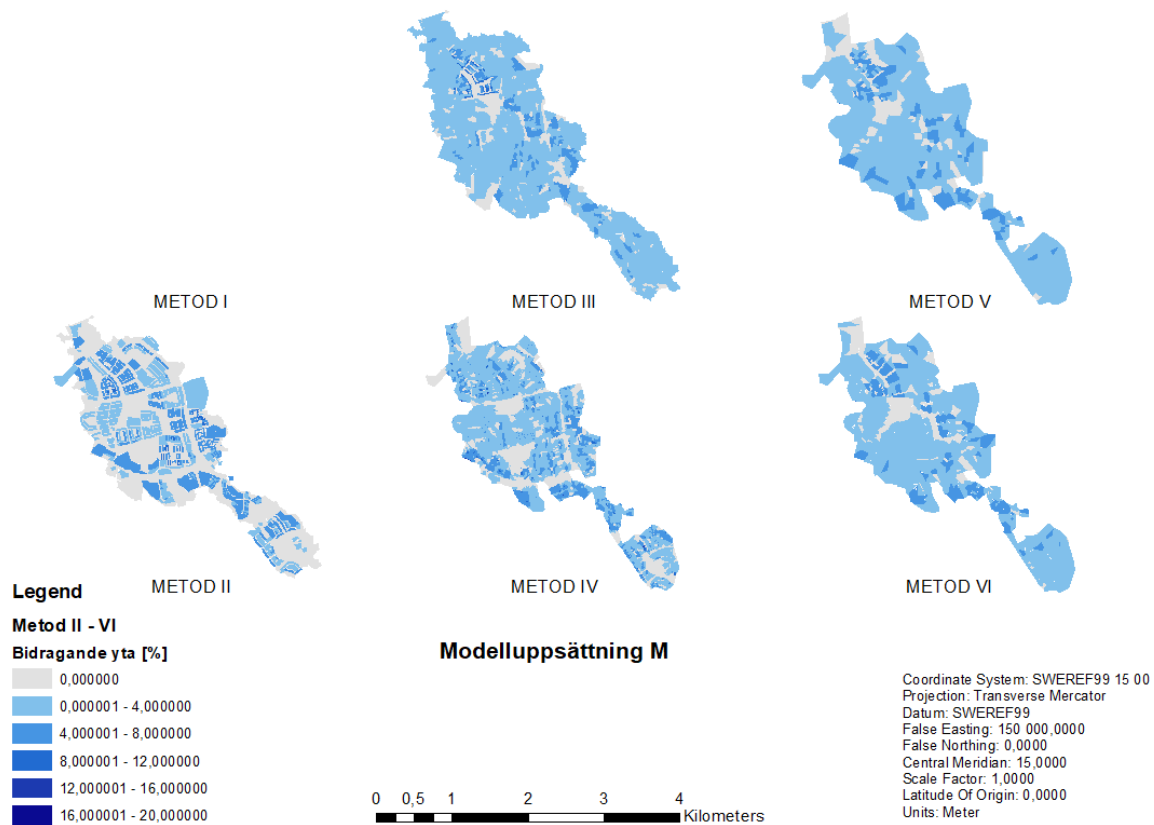
**Figur E3** Andel bidragande yta per delavrinningsområden inom modelluppsättning J för avgränsningsmetod II-VI.



**Figur E4** Andel bidragande yta per delavrinningsområden inom modelluppsättning K för avgränsningsmetod II-VI.



**Figur E5** Andel bidragande yta per delavrinningsområden inom modelluppsättning L för avgränsningsmetod II-VI.



**Figur E6** Andel bidragande yta per delavrinningsområden inom modelluppsättning M för avgränsningsmetod II-VI.