



Noregs miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgåve 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Samanlikning av HEC-RAS og MIKE 21 Flow Model FM to-dimensjonal hydraulisk modelleringsevne med utprøving av funksjonar i nedbørsfeltet Nadderud

Comparison of HEC-RAS and MIKE 21 Flow model
FM two-dimensional hydraulic modelling capability
by testing the capabilities in catchment area
Nadderud

Krists Mikus Zaurins
Vann- og miljøteknikk

1 Forord

Denne masteroppgåve markerer slutten av masterstudiet innanfor vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitetet (NMBU). Denne oppgåva er skrevet ved fakultet for realfag og teknologi og omfamnar 30 stp. Oppgåva omhandla hydraulisk modellering av overvatn i urbane nedbørsfelt.

Gjennomføring av masteroppgåve har vore veldig givande og lærerikt, men har til tider også vore krevjande. Eg vil takke Gud for å ha velsigna meg med desse studia og for å ha gitt meg motivasjon og helse gjennom masterperioden.

Eg vil også rette ein stort takk til rettleiaren min i denne oppgåva - Vegard Nilsen. Takk for all oppmuntring og kunnskapsrike tankar du har delt med meg, det har vore ein glede å ha deg som rettleiar. Videre vil eg takke Torbjørn Friborg for god innføring i nedbørsfeltet Nadderud og tips i bruk av verktøyet MIKE 21. Eg vil også takke Halvor Hardang for å ha tatt seg tiden for å sjå på modellen i MIKE 21 og kunne kome med løysinga for problemet presentert.

Sist men ikkje minst vil eg takke familie og vennar for å ha vist interesse i studiane og gitt kontinuerleg oppmuntring i studieperioden. Takk til alle dokke som gjorde studietida på Ås til ein glede.

2 Samandrag

Modellering av hydrodynamikken på overflaten har fått større fokus dei siste åra. Dette fordi ekstremnedbør forårsaka av fortetting og klimaendringar har store samfunnsøkonomiske konsekvensar for Noreg. NVE har utgitt første av tre rettleiarar for å hjelpe kommunar med denne problematikken. Nå som kommunar i større grad begynner å få eit nytt forhold til hydrauliske overflatemodellar er det viktig å belyse dette fagfeltet. Introduksjon av funksjonalitet for 2D hydraulisk modellering i HEC-RAS byr på spørsmålet om verktøyet er i stand til å lage modellar som er samanliknbare med andre etablerte verktøy, som til dømes MIKE 21. Oppgåva har som formål å samanlikne 2D modelleringsevne til HEC-RAS og MIKE 21. Dette ved å anvende begge verktøy på analysefeltet Nadderud der funksjonelle svakheita og styrka av dei enkelte verktøya beskrivast i lys av at kandidaten ikkje har tidlegare erfaring med verktøya. Desse funksjonane vart utforska ved å introdusere nye parameter i dei enkelte modellane for å sjå korleis dette påverke resultat. Parameter som vart utforska er tettheit på berekningsnett, bruk av detaljområde, bruk av varierte verdiar for botnfriksjon og berekning av simulasjonar ved forskjellige likningssett/metodar.

For å kunne ha eit grunnlag for samanlikning av resultatata på tvers av verktøy, vart 7 punkt plassert i feltet der punktseriar vart registeret i desse punkt for alle resultat. Korleis introduksjon av desse parameter påverke både vassdjup og hastigheit blei samanlikna på tvers av verktøy på grunnlag av desse tidsseriar. Videre vart resultat frå forskjellige modellar presentert grafisk. I HEC-RAS vart resultat frå paramter-introduksjon samanlikna også grafisk.

Resultat frå samanlikningspunkt påpeike behovet for gode terrengmodell og berekningsnett. Tettheita på berekningsnett har stor betydning for resultat i HEC-RAS, der grov berekningsnett plassert utan omhug kan introdusere grove feil. Resultat frå simulering gjort i MIKE 21 viser å ha ein viss usikkerheit ved bruk av høg ordens likningsløyser. Fordi modellen ikkje vart kalibrert, kunne ikkje noko resultat validerast. Det kunne likevel observerast betydeleg samsvar mellom resultat i MIKE 21 og HEC-RAS i fleire punkt, noko som kan forventast gitt riktig bruk av verktøy.

Brukarvenlegheita til begge verktøy vart også diskutert frå ein nybegynnar perspektiv, der HEC-RAS viste seg å vere meir brukarvenleg. Dette delvis på grunn av oversikteleg dokumentasjon, rettleiarar og video og ein meir intuitiv oppsett av funksjonar.

3 Abstract

Hydrodynamic modelling of surface water runoff has received greater focus in recent years. This is due to extreme precipitation caused by densification and climate change that has resulted in major socio-economic consequences for Norway. NVE has published the first of three guidelines to help municipalities deal with this problem. Now that municipalities are to a greater extent starting to have to reconsider their understanding of hydraulic surface runoff models, it is important to shed light on this field of study. The introduction of functionality for 2D hydraulic modeling in HEC-RAS raises the question of whether the software can create models that are comparable to other established tools in the modelling 2D runoff, such as MIKE 21. This thesis aims to compare 2D modeling ability of HEC-RAS and MIKE 21. This is done by applying both tools to the catchment area Nadderud. This is done by comparing strengths and weaknesses of both software, while also taking into consideration that the candidate has no previous experience with the software.

These strengths and weaknesses were explored by introducing new parameters in the individual models to see how this affects the result. Parameters that are explored are density of calculational grid, use of detail area, use of varied values for bottom friction and calculation of simulations by different equation forms.

To have a basis for comparing the results across both software, 7 points were placed in the catchment area. These points registered timeseries for all results. The effects of introducing new parameters on water depth and water velocity were compared across both software based on these time series. Furthermore, results from different models were presented graphically. Results from introduction of new parameters in HEC-RAS were also compared graphically.

Results indicate the need for good terrain models and calculational grids. The density of the calculational grid is of great importance for the results in HEC-RAS, as rough calculation grid placed without consideration can introduce serious errors. Results from simulation run in MIKE 21 show that there is a considerable uncertainty when using high-order equation solvers. Because the model was not calibrated, no results could be validated. Nevertheless, a significant correlation could be observed between the result in MIKE 21 and HEC-RAS in several points, something that can be expected given that the software is being used correctly.

The user-friendliness of each software was assessed from a beginner's perspective, where HEC-RAS proved to be more user-friendly. This is partly due to good scientific documentation, user-guides and informative videos and a more intuitive set-up of interface.

Innholdsfortegnelse

1	Forord.....	i
2	Samandrag	ii
3	Abstract.....	iii
4	Innledning	1
4.1	Problemstilling	1
4.2	Oppgåvas avgrensing og forutsetning	2
5	Bakgrunn & teori.....	2
5.1	Hydrauliske modellar	2
5.1.1	Eindimensjonale modellar	3
5.1.2	Todimensjonale modellar	4
5.1.3	Tredimensjonale modellar	6
5.1.4	Inngangsdata for modellering.....	6
5.1.5	Terrengbaserte analyser og andre metodar	7
5.2	Modelleringsbehov i handtering av overvatn.....	8
5.2.1	Nasjonale retningslinjer for handtering av overvatn	8
5.2.2	Internasjonal praksis & retningslinjer for handtering av overvatn.....	10
5.3	Modelleringsverktøy	11
5.3.1	HEC-RAS 2D ikkje stasjonær hydraulisk modellering.....	11
5.3.2	MIKE 21 2D ikkje stasjonær hydraulisk modellering.....	18
5.3.3	Tidlegare arbeid frå nedbørsfeltet Nadderud.....	22
6	Metode.....	23
6.1	PC-utstyr.....	23
6.2	Forutsetningar.....	23
6.3	Studieområde.....	24
6.4	Terrenggrunnlag.....	25
6.4.1	Eksport av terrengdata frå SCALGO Live.....	25
6.5	Nedbørsmodellering	26
6.6	Modelloppsett i HEC-RAS.....	29
6.6.1	Geometri	29
6.6.2	Ikkje stasjonær strøyming.....	33
6.6.3	Simuleringsplan.....	35
6.6.4	Presentasjon og resultatredigering.....	37

6.7	Modelloppsett i MIKE 21	38
6.7.1	Domain.....	38
6.7.2	Hydrodynamisk modul.....	40
6.7.3	Simulering & Resultatpresentasjon	43
6.8	Sensitivitetsanalyse.....	43
7	Resultat	49
7.1	HEC-RAS Resultat	49
7.2	MIKE 21 Resultat.....	56
7.3	Samanlikningspunkt.....	61
8	Diskusjon.....	69
8.1	Danning av modell	69
8.2	Samanlikningspunkt og resultat.....	71
8.3	Brukaroppleving og område av bruk.....	72
8.4	Videre arbeid.....	75
9	Konklusjon.....	76
10	Kjelde	77
11	Vedlegg 1	78
12	Vedlegg 2.....	83
13	Vedlegg 3.....	87

4 Innledning

I dag er det stort fokus på å bygge tettare, særleg i sentrumsområde. Dette er viktig for å kunne ta hand om auka befolkning og redusere transportomfang rundt desse knutepunkta (NOU:16, 2015). Dette vil kunne bidra til å gjere byene meir klimavennleg ved å legge til rette for gode kollektivtilbod og gode løysinga for gang- og sykkelveg.

Denne fortettinga kjem ikkje utan sine utfordringar. Meir tette flater gjere byrom mindre permeabel og såleis auke avrenning. Konsekvens av fortetting og klima som er i stadig endring gjere oss nødt å tilpasse oss denne endringa. Regjeringa har i 2015 anslått at samfunnskostnader for skader påført av disse endringa vil kunne vere oppimot 3,6 milliardar kroner i året på landsbasis (NOU:16, 2015).

Dette har ført til at overvassmodellering har fått meir oppmerksomd og behovet for nye metodar er etterlyst. Den rasjonelle formel gir eit godt grunnlag for å anslå mengde avrenning gitt eit nedbørshending i eit felt og er ein god metode for innleiande berekningar. Videre er det vanleg å dele modelleringsverktøy for overvatn i enten hydrologiske eller hydrauliske modellar. Kvar av desse har si bruk og er i stor grad avhengig av kvarandre. Hydrologiske modellar analyserer vatnets krets, og betraktar nedbør, infiltrasjon, avrenning, evapotranspirasjon og lagring av vatn. Metodar for slike modellar er ofte konseptuelle. Terrengframstilling i desse hydrologiske modellar ofte har låg oppløysing, der generell karakterisering av terrenget er nok. Terrengframstilling står meir sentralt i hydrauliske modellar, der terrenget og fysiske lover gir rammeverk for berekning av vassdjup og vasshastigheit. Hydrauliske modellar analyserer korleis vatn strøymar frå eit punkt til eit annet. Dette kan vere både på overflaten og i grunnen. Inndata for hydrauliske modellar ofte er resultat av hydrologiske modellar, som til dømes effektiv nedbør eller hydrografar.

Effektiviteten og bruksområde til disse modellane varierer, som kan gjere det vanskeleg å halde seg oppdatert med siste funksjonalitet og framgang i modellering av overvatn. Denne oppgåva skal ta for seg to programvare – MIKE 21 Flexible Mesh FM (utvikla av DHI i Danmark) og HEC-RAS (utvikla av US Army Corps of Engineers i USA) og samanlikne deira evne til å simulere overflatestrøyming. Sidan kandidaten ikkje har tidlegare erfaring frå modellering i disse verktøya, vil oppgåva også tydeleggjere forskjellar i brukarvenlegheit frå eit nybyrjar perspektiv. Videre skal disse verktøy brukast for å modellere ekstremnedbør for byområde Nadderud, som er eit urbant nedbørsfelt. Modellering vil utførast i to dimensjonar, der leidningsnett vil utelatast frå modellen. Dette for å ha mest mogeleg like forutsetningar for samanlikning.

4.1 Problemstilling

Målet med oppgåva er å samanlikne HEC-RAS og MIKE 21 Flow Model FM to-dimensjonal hydraulisk modelleringsevne med utprøving av funksjonar i nedbørsfeltet Nadderud.

Oppgåva har vidare som mål å belyse:

- Korleis terrengframstilling påverke resultat i MIKE 21 og HEC-RAS.
- Korleis friksjonsdefinerande lag påverke resultatet.
- Korleis bruken av varierende tettheit på berekningsnett påverke resultatet.
- Korleis kombinasjon av finare og grovare berekningsnett påverke resultatet.
- Brukarvenlegheita til begge verktøya og tilgangen på god støttelitteratur.
- Kan analyseverktøy dekke eit reelt behov i modellering av overvatn.

4.2 Oppgåvas avgrensing og forutsetning

Oppgåva har noko viktige avgrensingar som påverke arbeidsflyten og resultatata. Desse avgrensingane er som følgje:

- Det blir ikkje brukt meir enn tre programverktøy i danning av modellar. Desse er HEC-RAS, MIKE 21 Flow Model FM og SCALGO Live.
- Kalibrering og validering av modellar ikkje blir utført.
- Infiltrasjon og evapotranspirasjon er ikkje inkludert. Alt nedbør er effektiv nedbør.

5 Bakgrunn & teori

Dette kapittelet skal belyse den teoretiske bakgrunnen for hydraulisk modellering i 2D, der introduksjon av andre metodar for modellering vil bli gitt i mindre grad. Videre vil ein beskriving av tidlegare utført arbeid/forsking for analyseområdet bli gitt. Dagens og framtidens bruk for modellering i vatn bransjen blir omtalt vidare. Til slutt vil aspekt av interesse for oppgåva angående programma HEC-RAS og MIKE 21 bli omtalt i meir detalj.

Det har gjennom tiden blitt utvikla fleire metodar for kartlegging av pluvial flaum. Desse metodar har forskjellige område av bruk, som ofte er kopla opp mot grad av kompleksitet. For å oppnå best resultat er det derfor viktig å kjenne til styrkane og svakheita til desse metodane og anvende dei der dei har mest nytte. I det vidare skal hydrauliske modellar bli omtalt i meir detalj.

5.1 Hydrauliske modellar

Hydrauliske modellar er basert på matematiske formelar som beskriv fysiske lover innan væskerørsle. Denne tilnærminga til modellering har dei siste åra fått auka oppmerksomd og har såleis blitt anvendt til fleire bruksområde. Eksempel på dette er modellering av flaum i urbane strøk. Denne metoden er godt

egna for å simulere tidsavhengig vassdjup og vasshastigheita rundt kritiske punkt. Simuleringsresultat blir oppnådd ved å løyse Saint-Venant likningar som er ein forenkling av Navier-Stokes likningar, såkalla grunt vatn likningar (Shallow water equations). Her er det viktig å påpeike at Navier-Stokes likningar beskriver væske strøyming i 3 dimensjonar, der grunt vatn likningar gjelder berre for 1 og 2 – dimensjonal strøyming. I disse omstende antar ein hydrostatisk trykk og utelet strøyming i vertikal eller z dimensjon. Ein kan vidare gjere fleire forenklingar for å minke tidsforbruket og kompleksitet av berekningar. Viss strøyminga kan betraktast til å ha ein dominant retning, kan ein modellere grunt vatn likningar i 1 dimensjon (1D). Med utgangspunkt i kor mange dimensjonar ein betraktar, er det vanleg å dele hydrauliske modellar i ein, to og tredimensjonale modellar.

5.1.1 Eindimensjonale modellar

Eindimensjonale modellar (1D modellar) er godt egna til framstilling av strøyming langs ei linje, ei tenkt senterlinje. Eksempel på dette er kanalstrøyming eller røyrstrøyming. Berekinga går ut på å dele senterlinja i fleire tverrsnitt, gjerne med konstant avstand med ekstra tverrsnitt der strøymingsbilete/kanalgeometrien varierer raskt. Videre er snitt fart berekna for kvar tverrsnitt (Teng et al., 2017). Avstand Δx mellom to tverrsnitt kan betraktast som kontrollvolum i ei celle for 2D modellering (beskrive under), der grunt vatn likningane blir løyst for kvar tverrsnitt. Utgangspunktet for 1D modell er DTM (digital terrain model, eller terrengmodell) som beskriver kanalløpet eller terrenget der strøyminga skal bereknast. Praktisk sett er det naudsynt å ha ein terrengmodell i område der tverrsnitta er definert. Dette fordi høgda på vassflate blir interpolert mellom tverrsnitta. Døme på 1D tverrprofilar er vist på figur 1. Videre kan det være naudsynt å ha kart over terrengforhold for å kunne avgjera manningstallet eller andre parameter for friksjon. For at berekinga skal kunne gjennomførast er det naudsynt å beskrive forhold for gitte simulering. Dette vil vidare bli omtalt som startvilkår og grensevilkår. Døme på grensevilkår er vasstands nivå eller vassføring oppstrøms/nedstrøms langs senterlinja og startvilkår beskriver forhold som eksisterer når simulering startar.

Massebevaring er grunnleggjande prinsipp i væskestrøyming. Prinsippet går ut på at masse eller i dette tilfellet vatn, ikkje kan bli til ut av ingenting eller forsvinne til ingenting. Dette blir i hydrauliske berekingar sørga for ved å introdusere konsept om kontrollvolum. Bevaring av masse er gitt ved likninga (1) (Bulti & Abebe, 2020)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

På same måte som bevaring av masse, er også bevaring av rørslemengde eit grunnleggjande prinsipp i fysikken og brukast derfor i bereking av hydrauliske modellar. Dette prinsippet byggjer på Newtons 2. lov som seier at kraft er definert som masse multiplisert med hastigheit. Akkurat som for bevaring av masse, skal også bevaring av rørslemengde sørgjast for ved hjelp av kontrollvolum. Bevaring av rørslemengde er gitt ved likninga (2) (Bulti & Abebe, 2020)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

der

Q = vassføring (m³/s)

t = tiden

A = areal av våt periferi (m²)

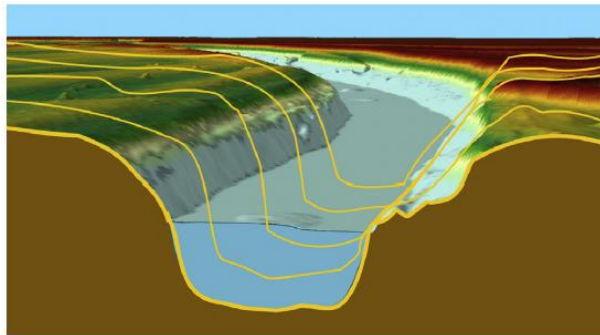
x = distanse (m)

y = vassdjup

g = akselerasjonskonstant

S_0 = kanalhelling

S_f = friksjonshelling



Figur 1: Illustrasjon av 1D hydrauliske tverrprofiler

5.1.2 Todimensjonale modellar

Todimensjonale modellar (2D modellar) utvidar metodikken brukt i 1D modellar til å gjelde i to aksar. Der berekningar vart utført langs ei senterlinje i 1D modellar, kan vasstraum bereknast over eit plan for 2D modellar. I 1D modellar vart utveksling av vassmengd utført i tverrsnitt, som var konstruert vinkelrett på senterlinje. I 2D modellar blir utvekslinga styrt av alle avgrensingar for ei gitt celle. Her kan cella ha enkle form, som firkantar eller trekantar eller fleirkanta celler (opp imot 8 kantar for HEC-RAS). Utveksling av vassvolum blir då utført vinkelrett på desse cellesidene.

Bevaring av masse

I 2D strøyming er kvar celle/rute i berekningsnettlet eit kontrollvolum, der det som kommer inn må vere lik det som går ut pluss det som blir lagra i kontrollvolumet. Bevaring av masse i 2D er gitt ved likninga (3) (Bulti & Abebe, 2020):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

der

h = vassdjup

t = tiden

u og v = djupe gjennomsnitte komponentar for hastigheita i respektive x og y- retning

Bevaring av rørslemengde

Likninga for bevaring av rørslemengde i 2D er gitt ved likningane (4) og (5) (Bulti & Abebe, 2020):

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = \underbrace{gh(S_{0y} - S_{fy})}_4 \quad (5)$$

der

g = tyngdeakselerasjon

S_0 = helling på vassoverflate i respektive retning

S_f = helling på friksjonslinje i respektive retning

(1) = lokal akselerasjon

(2) = konvektiv akselerasjon

(3) = trykkgradient

(4) = friksjonsledd

Modellar som beskriv strøymingsbilete i 2 retningar er godt egna for å berekne pluviale flaum. Dette fordi strøymingsbilete i urbane strøk er variert, grunna fleire type hindringar (bygg og infrastruktur). På lik linje som berekninga for 1D modell, vil 2D modellar bestemme vasshastigheita, vassføringa og vasstansendringa ved å løyse grunt vatn likningar. Desse partielle differensiallikninga er ikkje lineære og har derfor ikkje ein analytisk løysing, som gjere det naudsynt å anvende numeriske skjema. Her kan modellane klassifiserast i «finite element», «finite difference» og «finite volume» numeriske metodar.

For å løyse tidsvariasjon over modellområdet kan ein gå fram enten implisitt (ved å løyse heile modellområdet for gitt tidssteg) eller eksplisitt (ved å løyse ein gitt eining i modellområdet uavhengig av å ha løyst heile modellområdet for gitt tidssteg).

Framstilling av terrenget er ein anna måte modelleringsverktøya kan klassifiserast. Overordna kan ein dele terrengframstilling som enten strukturert grid/rutenett, ustrukturert mesh eller fleksibel mesh (Teng et al., 2017). Terrengframstilling vil i større grad beskrivast i avsnitt om HEC-RAS og MIKE 21.

Gitt disse klassifiseringa, må ein også betrakte forenklingar som kan gjerast i sjølve grunt vatn likningar. Eitt eller to av akselerasjonsledda i likningane kan fjernast som resultere i diffusiv bølge eller kinematisk bølge likningar. Disse forenklingar blir ofte kalla 2 og 3 ledds formuleringar. Der 2-ledds formuleringa viser til kinematisk bølge som utelet ledda 1, 2 og 3 i likninga 5. Denne tilnærminga har ulempe for modelleringa i 2D, som gjere diffusiv bølge tilnærminga meir brukt. Her blir lokal og konvektiv akselerasjon utelat frå likningane (Guo et al., 2021).

I seinare tid har det blitt utvikla modellar som koplar 2D modellar med 1D modellar. Fleire modellverktøy har funksjonalitet for å kopla elveløp eller kanalløp som ofte er modellert i 1D med omkringliggende 2D område, som kan også vere eit urbant felt. Grunna mindre berekningstid for 1D modell, vil denne koplingsfunksjonalitet minke samla prosesseringsbehov og simuleringstid for denne type kopling. Ein annan type kopling som er meir relevant i urbane strøk er kopling mellom 2D overflatemodell og 1D leidningsmodell. Her vil modellen kunne ta høgde for at vatn kan lagrast og fraktast i leidningsnett i tillegg til overflaten. Denne type kopling er meir prosesseringskrevande fordi 1D leidningsmodell kjem på toppen av 2D overflatemodell i motsetning til 1D kanalløp eller elveløp der 1D modell erstattar behov for 2D overflatemodell i området. Om kopling av 2D overflatemodell og 1D leidningsmodell ikkje er mogeleg, er det vanlig å trekke frå sjablongverdiar for å ta høgde for antatt kapasitet i leidningsnettet (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022).

5.1.3 Tredimensjonale modellar

I tilfelle der 2D framstilling av flaum ikkje er tilstrekkeleg, bruker ein 3D modelleringsverktøy. Dette er særst viktig der vertikal strøyming ikkje kan forenklast som i 2D modellering. Vanlege bruksområde er demningsbrot, styrtregn, vollbrot og modellering ved kritisk infrastruktur med skarpe bend. Som 1D og 2D modellering, tek 3D hydraulisk modellering utgangspunkt i Navier-Stokes likningar.

5.1.4 Inngangsdata for modellering

Kvaliteten av hydrauliske modellar er i stor grad avhengig av kor gode inngangsdata modellen byggast på. Mengde inngangsdata modelleringsverktøy brukar varierer frå verktøy til verktøy. Desse inngangsdata kan klassifiserast i to grupper. Dei grunnleggande inngangsparameter er topografiske målingar, som terrengdata og klassifisering av overflate (ofte i form av manningstall). Dette gir dei

fysiske vilkår for modellering. Videre bestemmas kva hending det skal modellerast for. Desse vilkår er definert som grensevilkår, fordi dei ofte opptre i utkanten av modelleringsfeltet. Eksempel på grensevilkår er vassføring inn og ut av feltet eller nedbørsmålingar (Mignot & Dewals, 2022).

Terrengdata har sidan 2016 sett stor framgang, med lansering av nasjonal prosjekt der heile landet skal dekkast. Dataa er fritt tilgjengelege på nettside hoeydedata.no og nå dekker 230 000 km². Prosjektet blei avslutta 2021 og siste skann gjort tilgjengelege i mars 2022 (Kartverket, 2022). Dette blei gjort mogeleg med teknologien LIDAR – «light detection and ranging», som gjere innsamling av høgdedata mykje meir effektiv og automatisert. Høgdedataa samlast ved at infraraud lysbølgje blir sendt ut av eit fly eller drone og når lyset treffer bakken blir deler av lyset reflektert tilbake. Dataa samlast som punktsky og inneheldt eigenskapar som blant annet: intensitet, returnnummer, tal på retur, RGB verdi, GPS tid og skannvinkel (ESRI).

5.1.5 Terrengbaserte analyser og andre metodar

Det finnest analyseverktøy som ikkje tek utgangspunkt i kombinasjon av terrengmodell og matematiske likningar for beskriving av vassføring, men til dømes berre ser på terrengmodellen. Ein vanleg analyse å gjennomføre i tidleg fase for å danne overordna strøymingsbilete er GIS drenslinjeanalyse. Denne analysen deler terrengmodellen i eit rutenett og gir kvar rute ein høgdeverdi. Kvar rute vil da kunne drenere til naborute med lavast høgdeverdi, som gir grunnlag for drenslinjeanalysen. Ved å velje eit vilkårleg punkt i rutenettet vil man kunne vise drenslinja oppstrøms og visualisere nedbørsfelt for gitte punkt. Det er også vanleg å supplere drenslinjeanalyse med fylling av lågpunkt i terrenget, såkalla fill/sink-berekningar. Dette kan enkelt gjerast i dei fleste GIS verktøy eller på nettbaserte verktøy som SCALGO.

GIS analyse er eigna for å utføre kartlegging av omsynssoner i tidleg fase av planlegging. Eit føresetnad for dette er at terrengmodellen er justert for bruer, kulvertar, stikkrenner, murar og bygningar. Ved hjelp av denne analysen kan man identifisere maksimal teoretisk vasstand, drygingsvolum og overfløymt areal for lågpunkt i terrenget. Denne metoden er likevel ueigna for faresonekartlegging eller for prosjektering etter byggt teknisk forskrift grunna manglande opplysing om vasstandsending, vasshastigheit og vassføring, som er viktige parameter for å bestemme sannsyn for skade (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022). Her må det brukast modellverktøy som kan utføre 2D eller kople 1D og 2D hydraulisk analyse.

Andre og nyare metodar for modellering av flaum er «cellular automata models» (CA) og «artificial neural network model» (ANN). CA modellar løyser ikkje grunt vatn likningar for kvar enkel celle/rute i modellområdet, men i stede beskriver tilstand for forskjellige eigenskap for celler i rutenettet. Gitte regel bestemmer utbredelsen av flaumen (Guo et al., 2021). ANN modellar forsøker å nytte auka mengde data for å bestemme flaumforløpet. Metoden baserer seg på avanserte algoritmar som beskriver korleis data skal bevege seg mellom noder i nettverket og korleis denne bevegelsen påverkar gitte algoritmar. Denne metoden bruker hydrauliske simuleringar for kalibreringsformål. ANN har som hovudoppgåve å minke prosesserings tiden for å gjere sanntidsmodellering av flaum mogeleg (Berkhahn et al., 2019).

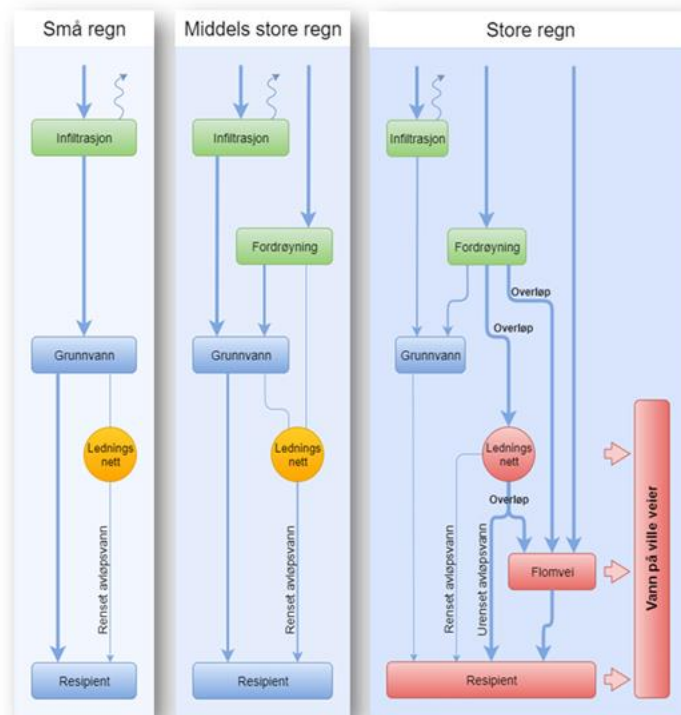
5.2 Modelleringsbehov i handtering av overvatn

Dette kapittel skal gi ein introduksjon for handtering av overvatn frå kommunens ståpunkt og belyse krava, behovet og status for hydraulisk overvassmodellering nasjonalt og internasjonalt.

5.2.1 Nasjonale retningslinjer for handtering av overvatn

Viktigheita av gode overvatn løysingar har fått auka oppmerksomheit dei siste tiåra. Tidlegare har overvatn vore omtalt som noko som må ledast bort fortast mogeleg i lukka rør, men no er det i større grad sett på som ressurs som skal utnyttast lokalt. Større nedbørshendingar vil likevel by på utfordringar, då særleg i byrom med mange tette flater. Derfor er det viktig å kunne klassifisere nedbør og handteringa av den. Dette for å kunne utforme handlingsplan og strategi i planlegginga av morgondagens byar og uteområde. Norges vassdrags- og energidirektorat har nyleg fått utvida ansvarsområdet sitt frå statlege forvaltningsoppgåver for førebygging av flaumskadar til å også omfatte kunnskapsmessige bidrag til kommunane (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022). Denne utvidinga av ansvar har resultert i blant annet nye rettleiarar for kommunal handtering av overvatn. I 2022 publiserte NVE «Rettleiar for handtering av overvatn i arealplanar», som er første rettleiarar i serie av 3 NVE skal publisere i løpet 2022/2023. Den nypubliserte rettleiaren byggjer på tretrinnsstrategien, sjå figur 2 og beskriver korleis hydraulisk modellering kan bidra til å betre arealplanlegging.

Tretrinnsstrategien beskriver korleis kommunar skal handtere forskjellig mengde nedbør. Strategien omhandlar alt frå dagleg nedbør til 100 års flaum. Her skal små regn fanges opp, infiltrerast og evapotranspirerast som del av første trinnet. Det andre trinnet skal sørge for at middels intens regn skal også drygast lokalt, dette i form av opne overvassløysingar som blågrøne tak, drygningsbasseng eller regnbed. Er det snakk om ekstremnedbør som inntreffer kvar 100. år eller skjeldnare, er det akseptabelt at nedbøren føres til sjø eller vassdrag ved trygge og planlagde flaumveggar. Her er det viktig å påpeike at disse flaumvegane skal vere trygge og påføre minst mogeleg skade til omgivnadene. Dette trinnet skil seg frå dei to første ved at den handterer nedbørsfeltet overordna, i motsetning der dei to første handterer avgrensa nedbørsmengd lokalt. Det siste trinnet i strategien inneheld merkeleg usikkerheit i form av ekstrapolering av nedbørsdata, val av klimafaktor og bestemming av vassføringsmønsteret. Med auka tilgang på gode høgdedata og framgang i modelleringsverktøy, kan riktig bruk av verktøya minke usikkerheita knyta til vassføringsmønsteret og vassføringsmengd, og såleis sørgje for tryggare flaumveggar.



Figur 2: Tretrinnsstrategien (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022)

Det er viktig at kommunen overheld lovverket og forskrifter når infrastruktur for overvatn skal planleggjast. Sentrale lovverk og forskrift som skal overhaldast er Plan og bygningsloven, Forurensningsloven og byggteknisk forskrift med tilhøyrande rettleiar TEK17. I Prop. 1 S (2018–2019) frå Olje- og energidepartementet blei NVEs fagområde utvida til å hjelpe kommunane med å førebygge skadar frå overvatn gjennom å bidra med kunnskap om avrenning i urbane strøk (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022). Etter å ha publisert «Rettleiar for handtering av overvatn i arealplanar» planleggjar NVE å kome med to supplerande rettleiarar i løpet av 2022/2023: ein teknisk bransjerttleiar for korleis ein kan modellere urbane felt, og ein rettleiar om innsamling av måledata til modellering og prosjektering av overvasstiltak. Disse rettleiarane vil kunne gi kommunane ein nasjonal rettleiar for korleis overvatn kan handterast på ein berekraftig måte.

NVE tydeleggjere problematikken rundt det å bestemme risikoaksept for konsekvens av nedbør i rettleiaren ved å skrive: «Det er ikkje mogleg å sikre samfunnet heilt mot fare eller skade frå overvatn. Da det ikkje føreligg lov eller forskrift som gir føringar for kva tryggleik kommunen skal legge til grunn, må kommunen sjølv ta stilling til tilstrekkeleg tryggleik mot fare og skade frå overvatn, jf. pbl. §28-1 og dei generelle krava i TEK17 § 7-1» (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022). Rettleiaren til NVE identifiserer klimajustert 100-årsregn som dimensjonerande for tredje trinn. For å betre kartlegge fare og skade frå overvatn foreslår NVE bruk av 3 analyser: analyse av vassdjupn, vasshastigheit og produktet av vassdjup og hastigheit, såkalla DV analysekart. Disse analysane vil kunne gi grunnlag for å sette ein maksimalverdi som seier noko om fare for personar på utomhusareal, fare for bygning og fare ved tilkomst. Figur 3 viser bruk og behovet for hydraulisk overflatemodellering ifølgje NVE.

Detaljert metode	Hydraulisk overflatemodell	Hydraulisk overflatemodell og leidningsnettmodell (kopla modell)
Plannivå	Reguleringsplannivå for kartlegging av reell fare (faresoner). Kan brukast på alle plannivå og ved prosjektering	Reguleringsplannivå, for kartlegging av reell fare (faresoner). Spesielt fortetting og transformasjon i område med store verdiar. Kan brukast på alle plannivå og ved prosjektering
Resultat	Kart og/eller maksimalverdiar for vasstand, vassføring, hastigheit, strøymingsretning (2D-modellar), tid vasstanden er over ein gitt verdi (f.eks. 10 cm), og DV Kan trekke frå sjablongverdiar for kapasiteten i leidningsnettet	Kart og/eller maksimalverdiar for vasstand, vassføring, hastigheit, strøymingsretning (2D-modellar), tid vasstanden er over ein gitt verdi (f.eks. 10 cm), og DV Fyllingsgrad og flaskehalsar i leidningsnettet
Kommentar	Det blir ikkje tatt omsyn til fordelinga av vatn mellom terrengoverflata og leidningsnettet. Det er dermed ein viss risiko for å undervurdere faren for overfløyning lågt i feltet og overvurdere faren høgare i feltet.	Modellen kan utvidast med elvmodell og/eller havmodell. Metoden simulerer fullstendig det dynamiske samspelet mellom vatn på terrengoverflata, leidningsnettet og eventuelt elv og hav, gitt at ein har gode data til kalibrering og validering av modellen.
Programvare/ rettleiarar	Lisensierte og opne programvarealternativ. Krev normalt konsulentbistand til datainnsamling, modelletablering, kalibrering og validering	Lisensierte og opne programvarealternativ. Krev normalt konsulentbistand til datainnsamling, modelletablering, kalibrering og validering
Nedbør/avløp som inndata	Ja, i form av kasseregner, reelle hendingar, IVF eller designregner. Avløpsdata der det er tilgjengeleg	Ja, i form av kasseregner, reelle hendingar, IVF eller designregner. Avløpsdata der det er tilgjengeleg
Nødvendig kompetanse	Ekspertkompetanse på hydrologi, hydraulikk og modellering (GIS)	Ekspertkompetanse på hydrologi, hydraulikk, VA-teknikk og modellering (GIS)
Ressursbehov	Høgt	Særs høgt

Figur 3: Tabell over bruk og behovet for hydraulisk overflatemodellering (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022)

5.2.2 Internasjonal praksis & retningslinjer for handtering av overvatn

På lik linje med Norge er det fleire andre land som ser viktigheita av å legge til rette for gode overvassløysingar. I 2015 skreiv COWI rapport om «Overvassarbeid i utlandet» i oppdrag for Miljødirektoratet (COWI, 2015). Rapporten belyser verkemiddel brukt av andre land for å sørge for god overvasshandtering. Disse verkemidla er: juridiske, økonomiske, kommunikative og samordningsmiddel. Denne store bredda i bruken av verkemiddel viser kompleksitet i overvasshandtering. Eit eksempel der grøn tak blir eit krav for bygg større enn 2000 m² finnes i Toronto, Canada. Dette er noko vi har eksempel på her i landet også, med Oslo kommune sin nye strategi for grønne tak og veggar i 2021. Eit annet eksempel er IKEA i Bergen og blå-grønne taket for bygget Vega Scene.

Andre land og kommunar ser på moglegheita til å innarbeide overvassavgift i lovverket. Dette var først prøvd i Växjö kommune i 2014, men er no i bruk i fleire kommunar i Sverige (Gøteborg og Jönköping) (Jönköping kommun) (COWI, 2015). I Gøteborg er avgifta for privateigedom definert utifrå størrelsen på røyrledning og offentleg eide tomt blir fakturert basert på type overflate (permeabel og ikkje-

permeabel) per m², der ikkje permeabel overflate er dyrare (Göteborg kommun, 2022). I Växjö kommune er formålet med å innføre avgift for overvatn å engasjere tomteeigarar i handtering av overvatn på eiga tomt. Det gis rabatt på avgifta etter utført tiltak eller avgifta fjernes heilt. Danmark har i følgje rapporten kome lengst i å definere desse verkemidla, der juridiske lovendinga står sentralt. Disse endringa gir vatn selskap meir økonomisk friheit, men også ansvar for vedlikehald av tiltaka. Vidare er det fleire kommunar som har overvatn avgift. Verkemiddel i form av pålegg er som regel retta mot nye konstruksjonar, og subsidier er retta mot eksisterande konstruksjonar. Utvalet konkluderer at desse verkemiddela ikkje kan direkte implementerast i Norge, sidan lovkontekst og rammevilkåra er forskjellige. Det er likevel ynskjeleg at samspelet av verkemiddel lista over skal implementerast i Norge.

5.3 Modelleringsverktøy

Dette kapittelet beskriver hydrauliske modelleringsverktøya samanlikna i denne oppgåva i meir detalj. U.S. Army Corps of Engineers' River Analysis System (videre omtalt som HEC-RAS) er eit hydraulisk modelleringsverktøy utvikla av Hydrologic Engineering Center. Verktøyet gir brukaren mogelegheit til å utføre ein-dimensjonal stasjonære, ein og to-dimensjonal ikkje stasjonære hydrauliske kalkulasjonar, ikkje stasjonær sediment transport modellering, vatn temperatur modellering og generalisert vatn kvalitets modellering. Første versjon av HEC-RAS var lansert i juli 1995 og versjon 6.2 blei lansert mars 2022 (nyaste versjon). MIKE 21 Flow Model FM (vidare omtalt som MIKE 21) er eit modelleringsverktøy levert av Dansk Hydraulisk Institutt (DHI). Modelleringsverktøyet er basert på flexible mesh terrengframstilling og brukast primært i oseanografi, kyst og elv miljø. Vidare inneheld MIKE 21 moduler for hydrodynamikk, transport, ECO lab/oljesøl og sedimenttransport. Verktøyet løyser to-dimensjonal forenkling av Navier-Stokes likningar, såkalla grunt vatn likningar som er integrert over vassdjupe og brukar eddy viskositet. Vidare vil 2D ikkje stasjonær hydraulisk modellering for dei enkelte verktøya bli gjennomgått i meir detalj.

5.3.1 HEC-RAS 2D ikkje stasjonær hydraulisk modellering

2D modellerings funksjonaliteten til HEC-RAS er basert på Saint-Venant likningar også kjent som grunt vatn likningar (videre omtalt som GVL). Disse likningane er ein forenkling av Navier-Stokes 3D likningar som beskriv væskestrøyming der inkompressibilitet, uniform tettheit og hydrostatisk trykk er antatt. Vidare blir turbulens ivaretatt ved Eddy viskositet. Likningane er basert på bevaring av masse og rørslemengde (Newtons andre lov).

Når grunt vassføring hovudsakleg er bestemt frå botnfriksjon og tyngdekraft, kan likningane for rørslemengde vidare forenklast til såkalla diffusiv bølge likningar. Kombinasjon av desse likningar og likningar som beskriver bevaring av masse gir oss diffusive bølge tilnærming av grunt vatn likningar. Denne formuleringa er berekningsmessig enklare og er derfor brukt der det er hensiktsmessig.

Berekningstida kan ytterlegare optimaliserast ved å anvende subgrid batymetri. Denne metoden går ut på å anvende to grid (rutenett/sjikt) med forskjellig tettheit, der finere grid tar vare på terrengvariasjonen og grovare grid gjere berekningane hyppigare.

Grunnleggande likningar

Kontinuitetslikninga i to dimensjonar er gitt ved likninga 6

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (6)$$

der

H = høgda på vassflate

h = vassdjup

t = tiden

u og v = hastigheitskomponentar i respektive x og y- retning

q = punktvis inn- eller utstrøyming (kjelde/sluk)

Rørslelikninga i to dimensjonar er gitt ved likningane 7 og 8

Rørslelikninga gjelde under desse vilkår:

- Det horisontale lengdeskala er mykje større enn det vertikale lengdeskala, som fører til at man neglisjerer vertikale variasjonar i hastigheit
- Hydrostatisk trykk
- Inkompressibel væske, uniform densitet
- Fråvær av sterk vindkraft

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_c u = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad (8)$$

der

u og v = hastigheiter i kartesiske x og y retningar

g = tyngdeakselerasjon

z_s = høgde på vassflate

$v_{t,xx}$ og $v_{t,yy}$ = horisontal eddy viskositet koeffisient i x og y retning

$\tau_{b,x}$ og $\tau_{b,y}$ = botn skjærspenning i x og y retning (friksjon mot terrenget)

$\tau_{s,x}$ og $\tau_{s,y}$ = vindkrafta på overflate i x og y retning

R = hydraulisk radius

h = vassdjupn

f_c = coriolis parameter

Venstre sida av likningane inneheldt akselerasjonsledda og høgre side representerer interne og eksterne krefter som verkar på væsken. Desse likningane er grunnlaget for full grunt vatn likningar eller såkalla «full moment» tilnærminga i HEC-RAS.

Botnfriksjon

Skjærspenningen mot terrenget er gitt ved formel 1 og 2 i vedlegg 1. Forholdet mellom luftmotstandskoeffisienten C_D og ikkje lineære friksjonskoeffisienten c_f er gitt ved formel 3 i vedlegg 1

Corioliseffekten

Grunna jordrotasjon rundt si eiga akse, er det naudsyn å ta høgde for corioliseffekten i modellering av store fenomen, t.d. havstraumar. For mindre felt er dette bidraget neglisjerbar. Corioliseffekten blir ivaretatt i siste leddet i kontinuitetslikninga og er definert ved formel 4 i vedlegg 1.

Turbulens

Turbulens er eit viktig fenomen i dei fleste naturlege strøymingsfenomen, der komplekse virvel blir forma som følgje av kaotisk strøyming. Forminga av større virvel blir modellert ved gradientdiffusjonsprosess og er definert ved formel 5 i vedlegg 1

Diffusiv bølge forenkling av grunt vatn likningar

Kalkulasjonstid og stabilitetsproblem er vanlege problem i modellar som løyser grunt vatn likningar. Disse problema kan løysast ved å forenkle grunt vatn likningar. Diffusiv bølge forenkling av grunt vant likningar går ut på å neglisjere turbulens, akselerasjon og coriolis effekt. Denne forenklinga er berre gjeldande der friksjon og tyngdekraft er dei største faktorar i strøyminga. Denne forenklinga av rørlelikningar er definert ved formel 6 i vedlegg 1

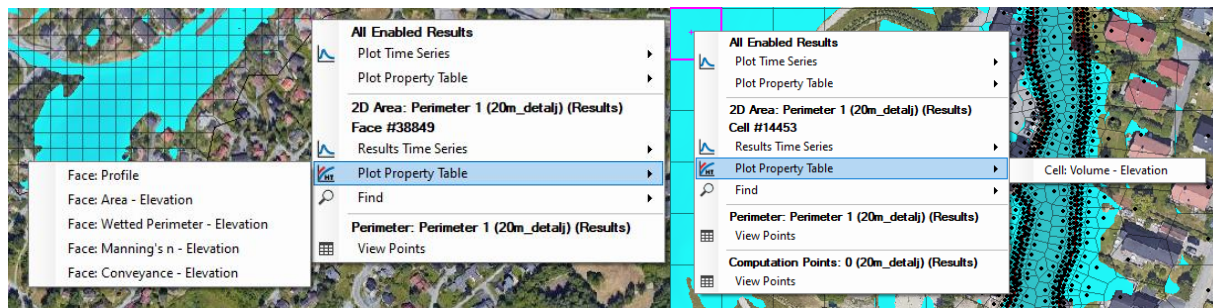
Setter så diffusiv bølge form av grunt vatn likningar i bevaringslikningane, for å få ein forenkla likningssett gitt ved formel 7 og 8 i vedlegg 1

Terrengframstilling

Danning av ei god digital terrengframstilling som fangar opp variasjonen i terrenget er avgjerande i å få representativ strøymingsbilete. I HEC-RAS kan terrengdata i høg oppløysing utnyttast i sin heilskap ved å danne eit sekundært rutenett (engelsk - subgrid) for berekning. Dette innebere at verktøyet skilje mellom den fysiske terrengframstillinga og det berekningsmessige rutenettet. Dette gir brukaren moglegheit å nytte tettare rutenett for terrengframstilling og grovare nett for berekningsnettet. Fordelen med å bruke eit sekundært rutenett som er grovare enn tettheit på terrengdata ligger i å gjere berekninga mindre tidskrevande.

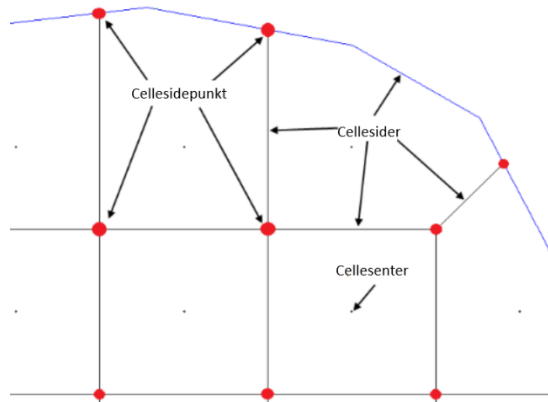
Det sekundære berekningsnettet deler terrengmodellen i ruter/celler. Desse cellene kan bestå av opp til 8 sider og kan derfor tilpassast forskjellige formar. Dette rutenettet består av cellesenter, cellesider og cellesidepunkt som vist på figur 5. Vassoverflate blir berekna i cellemidt. Cellesider er i praksis snittprofilar av terrenget langs cellesidene. Cellesidepunkt blir brukt for å kopla 2D berekningsnettet med 1D objekt/område eller grensevilkår.

Terrengframstilling skjer ved at terrengdata blir importert i sin heilheit. Her kan punkttheit ligge på 0,5m eller finere utan å introdusere problem. Terrengmodell blir ikkje brukt direkte i berekninga av hydrodynamikken, men heller eigenskapstabellar som blir oppretta i preprosesseringa av simuleringa. Eigenskapstabellar blir oppretta for kvar celle og alle cellesidene i berekningsnettet på grunnlag av terrengdata. Desse tabellane er vist på figur 4 der face referere til celleside og cell er ei enkel celle i berekningsnettet.



Figur 4: Eigenskapstabellar for celleside (til venstre) og ei celle (til høgre)

Denne tilnærminga gjere HEC-RAS noko unik i forhold til andre verktøy, der ein og same rutenett ikkje blir nytta for både terrengframstilling og berekning av strøymingsbilete. Det grovare berekningsnettet styre utveksling av vassmassen mellom rutene i berekningsnettet ved å anvende tabell for gitt celleside, mens det finere rutenettet som representerer terrengoverflaten sørgjer for bevaring av masse i rutene som representerast i tabell volum-høgde (Volume-Elevation). Videre vil desse to rutenetta bli omtalt som kapasitetsnett for finere terrengmodell og berekningsnett for det grovare nettet.



Figur 5: Elementer i berekningsnett

Tilpassing av berekningsnett

Berekningsnettet betraktar terrengdata langs cellesider som gjere plasseringa av cellesidene av høg viktighet. For at strøyminga skal vere riktig karakterisert, må cellesidene plasserast på strøymingshinder i terrenget. Videre kan det vere ønskeleg og naudsynt å ha tettare berekningsnett steder der strøyminga varierer raskt. Dette kan gjerast enten ved å definere brotlinjer eller detaljområde.

Brotlinjer kan leggjast inn i modellen enten før berekningsnettet er danna eller etterpå. Ei brotlinje skal teiknast på strøymingshinder eller strøymingsdefinerande objekt. Når ei brotlinje er lagt inn, vil den tilpasse berekningsnettet slik at cellesidene rundt brotlinja ligger på sjølve brotlinja. Dette sørgjer for at terrenget langs brotlinja blir fanga opp av eigenskapstabellar som dannast langs cellesidene.

Detaljområde brukast der ein ynskje finare eller grovare oppløysing på berekningsnettet. Ofte er årsaka til dette raskt varierende vassoverflate, som kan skyldast til dømes høg helling på vasslinja. Dette finare berekningsnett vil då vere i stand til å fange opp variasjonen på vasslinja på ein betre måte. Er tilfellet det motsette, der ein har område med einsforma terreng, kan berekningsnett gjerast grovare til fordel for berekningstida. Detaljområde og berekningsnett er illustrert på figur 27 i kapittel 6.8.

Terrengklassifiseringslag

Terrengoverflate kan klassifiserast for å gi romvarierende verdi for Mannings n tall eller infiltrasjonsdata.

I HEC-RAS er friksjon mot bakken definert med Mannings n tal. Den kan settast til same verdi for heile berekningsområde eller definerast utifrå romleg varierende terrengklassifiseringslag. Når terrengklassifiseringslag skal brukast kan dataa importerast som shape fil. Klassifisering av terrenget ikkje alltid samsvare med cellene i berekningsnett, noko som vart løyst i versjon 6.2 av HEC-RAS. Når ei celle har fleire verdi for Mannings n langs ei celleside, vil ein komposittverdi brukast i forhold til terrenghøgde.

Grensevilkår

Grensevilkår gir brukaren mogelegheit å bestemme kva type hending ein skal modellere. Forskjellige type hydrografar brukast ofte for innstrøyming oppstrøms i feltet. Ein kan også nytte vilkår som styrast av vatn nivå eller normaldjup, til dømes som utløpsvilkår. Videre kan forskjellige vilkår opprettast for å frakte vatn frå ei celle til ei anna, gjerne i forbindelse med basseng. I denne oppgåve skal nedbør nyttast som grensevilkår. Nedbøren leggst vanlegvis inn som regn på grid, med predefinert romleg variasjon eller ved hjelp av punktnedbør som då interpolerast ved hjelp av forskjellige metodar. Ein kan også modellere konstant nedbør over heile berekningsnettet.

Numeriske metodar

Som beskrive kort ovanfor er det fleire faktorar som skilje modelleringsverktøy. Ein viktig skilnad er om det berre analyserast for terreng, eller om matematiske likningar nyttast for å kunne seie noko om vasshastigheit og vasstandsendingar. Videre er det fleire verktøy som brukar same likningssett (grunt vatn likningar), gjerne med mindre variasjonar, for å kunne finne svaret på endringar i hastigheit og vasstand. Måten ein kan gruppere verktøya vidare er ved å sjå på korleis dei løyser disse grunt vatn likningar som ikkje har ein analytisk løysing. For å finne løysinga, blir forskjellige numeriske metodar nytta. For detaljert beskriving av numeriske metodar, sjå (Brunner, 2020).

Det finnest to overordna formuleringar for å løyse numeriske problem i hydrauliske modellar, Eulers og Lagranges formulering. Eulers formulering går ut på å betrakte enkelpartikkel i bevegelse, mens Lagranges metode går ut på å betrakte kontrollvolum. Dette resulterer i forskjellige måtar i å betrakte akselerasjons og trykk- gradient leddet i grunt vatn likningar.

HEC-RAS har eit numerisk skjema for å løyse diffusiv bølge likningssett og to skjema for å løyse heile grunt vatn likningssettet. For å løyse heile grunt vatn likningar kan ein velje å bruke ein kombinasjon av Eulers og Lagranges eller berre Eulers metode. Hovudforskjellen er at Eulers metode konserverer akselerasjonsleddet meir presis i rørslelikninga. Dette er av høgare viktighet der modellresultat samanliknast med lab forsøk. Ved val av numerisk skjema, må ein vere klar over forskjellar i maks tillat courant nummer, som er beskrive i meir detalj under.

Tidssteg

Det er ikkje uvanleg for hydrauliske modellar å lide av numerisk instabilitet, særleg i tidleg fase. Dette grunnast ofte feil val av tidssteg eller tettheit på berekningsnettet. Forhaldet mellom størrelsen på cella i nettet, hastigheita og tidssteg beskrivast ved hjelp av courants nummer. I tilfelle der hastigheit eller vasstand varierer raskt, vil kunne courants nummer over 1 føre til numerisk instabilitet. Courants nummer er definert ved formel 9 i vedlegg 1.

Krava til tilstrekkeleg lav courants nummer varierer med type numerisk metode, der Eulers metode har strengaste krav. Krava er gitt under

Lagranges – Eulers metode

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1 \text{ (med maks } C = 3.0) \quad (9)$$

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \text{ (med } C = 1) \quad (10)$$

Her er det viktig å påpeike at Courants nummer bør helst vere lik eller under 1 for å vere heilt sikker på at simuleringa vil køyre stabilt. Støttelitteraturen (Engineers) påpeike likevel at simuleringa vil oftast handtere Courants tall opp i mot 3. Dette fordi Lagranges – Eulers metode ikkje er like strenge på akselerasjonsledda. Diffusive bølge metode vil kunne handtere Courants nummer opp i mot 5 i dei fleste tilfella som vist på formel 13.

Eulers metode

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1 \text{ (med maks } C = 1.0) \quad (11)$$

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \text{ (med } C = 1) \quad (12)$$

Diffusive bølge metode

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 2 \text{ (med maks } C = 5.0) \quad (13)$$

$$\Delta T \leq \frac{2\Delta X}{V} \text{ (med } C = 1) \quad (14)$$

HEC-RAS har moglegheit å definere tidssteg som konstant verdi, ved å definere tidsserie for korleis tidssteget skal endrast eller som adaptiv verdi i forhold til courants tall. I denne oppgåva vil adaptiv tidssteg og konstant tidssteg nyttast. Variabel for definisjon av adaptiv tidssteg er beskrevet i støttelitteraturen til HEC-RAS (Brunner, 2020).

5.3.2 MIKE 21 2D ikkje stasjonær hydraulisk modellering

MIKE 21 er på lik linje med HEC-RAS i stand til å utføre 2D ikkje stasjonær hydraulisk modellering. Likninga som blir lagt til grunn er dei same som i HEC-RAS med mindre forskjellar. Her er også grunt vatn likningar brukt som grunnlag for berekninga. Formuleringa av bevaringslikningane for MIKE 21 er definert ved likningane 15, 16 og 17. Bevaring av masse er uendra i forhold til HEC-RAS, mens bevaring av rørslemengde har moglegheit å berekne hydraulikken med fleire parameter. Ledd som finnast i MIKE 21 og ikkje i HEC-RAS er: variasjon i vassstettheit, variasjon i atm. trykk og bølgespenning. Mangel på desse ledd i HEC-RAS ikkje har noko vesentleg konsekvens for resultatata, da disse ledd er viktig i hav og kyst hydraulikken og ikkje overflate hydraulikken.

Likningar for vindkraft, vassstettheit, bølgespenning og variasjon i atmosfærisk trykk vil ikkje gjennomgåast i meir detalj, fordi dei kan neglisjerast for oppgåva.

Kontinuitetslikninga i to dimensjonar

Bevaring av vassmassen i 2D er gitt av kontinuitetslikninga 15

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (15)$$

der

t = tid

x og y = kartesiske koordinatar

$h = \eta + d$ vassflate høgde

\bar{u} og \bar{v} = djupegjennomsnitte hastigheitskomponent i x og y retning

S = punktvis inn- eller utstrøyming (kjelde/sluk)

Rørslelikninga i to dimensjonar

Bevaring av moment er gitt ved rørslelikninga som beskrive under. Akselerasjonsledda er samla på venstre side av likningssettet, mens interne og eksterne ledd er samla på høgre side.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} - \underbrace{f\bar{v}h}_1 = \\ - \underbrace{gh \frac{\partial \eta}{\partial x}}_2 - \underbrace{\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}}_3 - \underbrace{\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x}}_4 + \underbrace{\frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0}}_5 - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right)}_6 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy})}_7 + \underbrace{hu_s S}_8 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + f\bar{u}h = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (17)$$

der

η = terrenghøgde

d = vassdjup

f = Coriolis parameter

g = tyngdeakselerasjon

ρ = vasstettheit

$s_{xx,xy,yy}$ = komponentar for bølgespenning

p_a = atmosfærisk trykk

ρ_0 = referanse vasstettheit

u_s og v_s = hastigheitskomponent for utveksling til omkringliggende vatn

τ_{sy} = vindkrafta på overflate i x og y retning

τ_{by} = botn skjærspenning i x og y retning

T_{ij} = sidespenningar som inneheld differensialadveksjon, viskos og turbulent friksjon

Leddb beskriving

(1) = Coriolis

(2) = tyngdeakselerasjon

(3) = atmosfærisk trykk

(4) = vasstettheit

(5) = vind og botnspenning

(6) = bølgespenning

(7) = turbiditet

(8) = kjelde og slukbidrag

Botnfriksjon

Friksjon mot bakken er definert som $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ og blir bestemt ved kvadratisk friksjonslov gitt ved formel 10 i vedlegg 1. For eit 2D berekningsfelt er \vec{u}_b djupe-gjennomsnitt hastigheit og luftmotstandskoeffisient kan bestemmast ved å enten bruke Chezy nummer – C, eller ved Mannings nummer -M. Disse er gitt ved formel 10, 11 og 12 i vedlegg 1. Det er ikkje noko vesentleg forskjell til korleis botnfriksjon i MIKE 21 er definert i forhold til HEC-RAS annet enn mogelegheita til å bruke Chezy formulering.

Coriolis parameter

Likninga for Coriolis parameter er definert som vist på formel 13 i vedlegg 1. Formuleringa i MIKE 21 har ingen forskjell i forhold til korleis den blir formulert i HEC-RAS.

Turbulens

I MIKE 21 blir turbulens for 2D berekningsfelt bestemt ved horisontal eddy viskositet. For mange tilfelle kan ein konstant eddy viskositet brukast. Er det ynskjeleg å bestemme eddy viskositet i meir detalj kan Smagorinsky tilnærminga brukast, der subgrid skala transport av effektive eddy viskositet relatert til karakteristisk lengde skala er gitt ved formel 14 og 15 i vedlegg 1. Det er igjen ikkje nemneverdige forskjellar mellom HEC-RAS og MIKE 21 i modellering av turbulens, då begge brukar Smagorinskys tilnærming.

Forenkling av likningar

MIKE 21 har funksjonalitet for å forenkla dei grunnleggjande hydrauliske grunt vatn likningane. Dette er i MIKE 21 omtalt som «Flood Screening Tool» (MIKE 21 FST). Forenklinga har sin bruksområde i berekning av innland flaum og gjere tidsbruken betydeleg mindre. Dette blir antatt ved MIKE 21 FST

- Konvektive ledd er neglisjert
- Viskose ledd er neglisjert
- Vind, atmosfærisk trykkvariasjon, Corioliseffekten, variasjon i vasstettheit og bølgespenning er utelat frå berekningar

Denne forenklinga er gitt ved formel 16, 17 og 18 i vedlegg 1.

Grunt vatn likningar kan også forenklast ved å bruke enklare numeriske skjema. Dette veljast under «Solution technique» som «Low order, fast algorithm». Her vil låg orden referere til kompleksitet i taylorutviklingen av ledda i likninga som brukast til å finne tilstrekkeleg god løysing på likningssett beskrive over (likningar 16 og 17).

Terrengframstilling

Som diskutert over, er ein presis terrengframstilling noko av det mest viktigaste i ein hydraulisk modell. I MIKE 21 blir terrenget framstilt ved ustrukturert fleksibel mesh (heretter triangelnett). Kvar triangel i nettet består av tre punkt, der kvar punkt har ei høgde. På grunnlag av disse 3 punkta kan man danne ei flate som skal vere representativ for terrenget i det området. Ein samling av disse flatene er det ein kallar fleksibel mesh i MIKE 21. Fleksibilitet i triangelnettet kjem av mogelegheit til å kunne definere område med mindre triangel, der høgare detaljnivå er viktig, og område med større triangel, der behovet for detaljar er mindre. Størrelsen på triangelet kan styres ved å endre maks lengde for ei triangelside i generering av triangelnettet (Ahn et al., 2019).

For å kunne bruke det genererte triangelnettet som terrenggrunnlag for hydrauliske berekningar, må triangelnettet definerast som batymetri. I utgangspunktet har MIKE 21 brukt begreip batymetri for å beskrive topografien under vatn, som havbotn eller innsjø. Batymetri definerer område der dei hydrauliske berekningar kan utførast. I denne oppgåva er batymetri terrengoverflate i nedbørsfeltet Nadderud.

Vatning og tørking av berekningsnettet

Som omtalt over, består berekningsnettet av mange triangulære flater av forskjellig størrelse. For å bestemme om ei flate, som også kan betraktast som ei celle, skal inngå i berekninga er det behov å definere reglar for når ei celle er våt eller tørr. Disse reglane er terskelverdi for når ei celle skal inngå i berekning og når den kan utelatast. Når ei celle har vasstand mindre enn tørketerskel (drying depth), vil vasstanden i cella resultera i 0. Når ei celle har akkumulert vasstand meir enn våt terskel (wetting depth) vil cella kunne ha vassføring til nabocellene og vasstanden registrerast i resultatata. Intervallet mellom våt terskelen og tørketerskelen definerast som delvis tørr (partially dry) intervall, eller flaumterskel (flooding depth). Når ei celle er delvis tørr, har altså vasstand over tørketerskel, men ikkje over våt terskel, blir rørslelikninga satt til null og berre kontinuitetslikninga blir betrakta.

I tillegg til å betrakte kvar enkel celle i berekningsnettet som enten er tørr, delvis tørr eller våt, blir også cellesidene til delvis tørre celler betrakta. For at ei celleside skal betraktast som overflødd må ei av cellesidene vere under tørketerskel og andre sida over våt terskel. Dette blir gjort for å sørge for at vatn ikkje kan strøyme ut av ei celle og tilbake i same tidssteg.

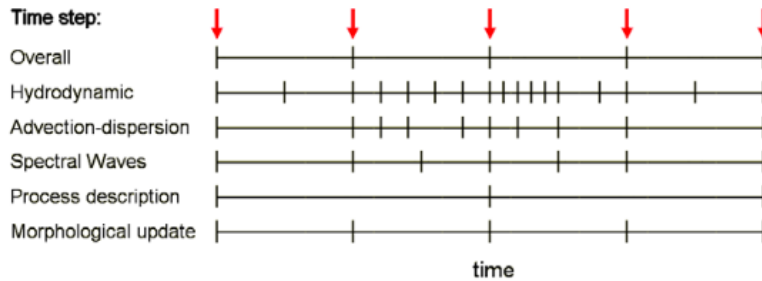
Numeriske metodar

I MIKE 21 blir grunt vatn likningar løyst numerisk ved «cell-centered finite volum» metode. Dette betyr at grunnleggande variabel som vasstand og hastigheitskomponent er gitt for senter av kvar triangel/celle og konvektiv flux er gitt ved Riemanns løyser ved å anvende Roes skjema. Disse blir rekna ut vinkelrett på cellesidene. Denne metoden er også brukt i HEC-RAS ved Eulers tilnærminga av grunt vatn likningar.

Tidssteg

Som beskrive over er val av riktig tidssteg essensielt for å ha numerisk stabilitet i modellen. I MIKE 21 er Courants nummer definert ved formel 19 i vedlegg 1.

Videre brukar MIKE 21 eksplisitt skjema for å løyse tidsintegrering, noko som fører til maksimal tillat Courants nummer = 1. Blir Courants nummer større enn 1, vil modellen kunne lide av numerisk instabilitet. Tidsintervallet blir i utgangspunkt rekna ut dynamisk. Dette inneberer at brukaren har moglegheit å definere intervall for framvising av resultat eller intervall der alle moduler har krav om å rapportere resultat. For hydrauliske berekningar, er det vanleg for brukaren å velje min og maks intervall, men ikkje spesifikt tidsintervall, sidan den er dynamisk tilpassa. Figur 6 viser dei forskjellige modular med varierende tidsintervall, der røde pilar er brukarbestemte intervall for framvising av resultat.



Figur 6: Variasjonen i nødvendig tidssteg

Store tidsinnsparing kan oppnåast ved å bruke låg orden algoritme for rom og tidsintegrasjon. Ved å velje låg orden for tidsintegrering vil tidsbruken halverast. Veljast låg orden for både rom og tidsintegrering vil tidsbruken bli 4x mindre. Tidsinnsparinga vil likevel kunne kome på kostnad av presisjon, då særleg viss konvektiv akselerasjon er dominerande.

5.3.3 Tidlegare arbeid frå nedbørsfeltet Nadderud

Det har tidlegare blitt skrevet 3 masteroppgåver på NMBU som omhandla nedbørsfeltet Nadderud. Lars-Gunnar Nordheim skreiv ei oppgåve i 2019 som heite «Utvikling av en kost-nyttmodell basert på urban flommodellering og FKB-data». Videre skreiv Stian Lundberg Bjørnsen i 2020 ei oppgåve med tittel «Optimal tiltaksstørrelse for lokal overvannshåndtering : samfunnsøkonomisk vurdering av case-område på Nadderud, Bærum» og i 2021 skreiv Stig Sander Høylye ei oppgåve med tittel «Samfunnsøkonomisk vurdering av lokal fordrøyning av overvann og dimensjonerende nedbør : en case-studie i Bærum kommune». Som tittel på oppgåvene tilseier, har dei si tyngde i analyse av det samfunnsøkonomiske konsekvensane for historisk styrtregn i Nadderud. Videre byggjer disse oppgåvene sine analyser i sin heilheit på hydraulisk modell levert av SWECO.

Denne modellen er utarbeida av Torbjørn Friborg og Gjermund Deggerdal i 2018 som del av prosjektet «Overvannskartlegging Nadderud» for Bærum kommune. Modellen er bygget i MIKE FLOOD som bruker same hydrauliske likningar og løysingskjema som MIKE 21. Forskjellen er at MIKE FLOOD har mogelegheit å integrere leidningsnett i modellen. Leidningsnett vart levert av ROSIM AS som vart oppretta på data frå GEMINI VA. Prosjektet var gjennomført av Bærum kommune som opplevde store nedbørsmengder den 6. august 2016 og 19. august 2017. Målet med prosjektet var å kartlegge flaumutsette områder og foreslå tiltak for å minke konsekvens ved framtidige regnhendingar.

6 Metode

Dette kapittel beskriver metoden brukt for å samanlikne HEC-RAS og MIKE 21 Flow Model FM 2D hydrauliske modelleringsevne. Det er viktig at denne modelleringsevna dekker eit reelt behov og er tilgjengeleg og brukarvenleg for potensielle brukarar. Ved å anvende disse verktøya på analysefeltet Nadderud vil den funksjonelle evna utforskast. Såleis vil problemstillinga svarast på ved å samanlikne dei teoretiske evna til verktøya, som er beskriver i teoridelen, og ved å anvende verktøya på eit analysefelt, for å gi eit bilde på tilgjengelege funksjonar og framgangsmåtar. Viktige ressursar brukt i oppgåva er

- Vitskapeleg litteratur
- Dokumentasjon gitt av verktøyleverandørar, i dette tilfellet MIKE, HEC-RAS og SCALGO
- Webinar og opplærings video

Torbjørn Friborg og Halvor Hardang var behjelpelige i denne oppgåva med å gi ein introduksjon til feltet i innleiande møte med kandidaten og ved å gi programtekniske tips.

6.1 PC-utstyr

Alt modellering i oppgåva vart utført ved hjelp av datamaskin Lenovo 80DU som har disse parameter

Prossessor: Intel(R) Core(TM) i7-4720HQ CPU @ 2.60GHz 2.60 GHz

Operativsystem: Windows 10 Home versjon 21H2

RAM: 16.0 GB

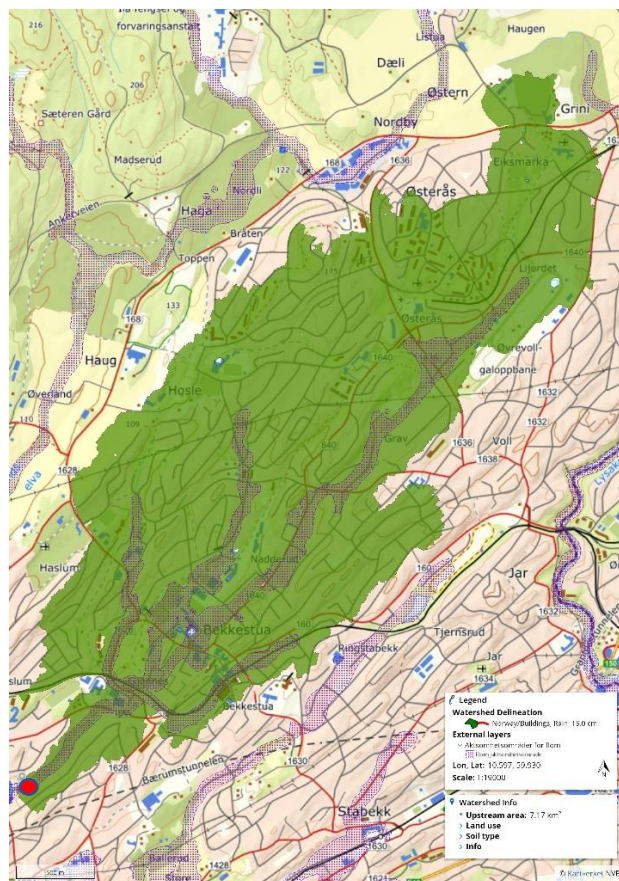
6.2 Forutsetningar

Forutsetningar utover dei som blir antatt av modelleringverktøy er

- Terrenggrunnlag eksportert frå SCALGO Live er representativt for faktisk situasjon
- Infiltrasjon og evapotranspirasjon er utelat
- Leidningsnettets kapasitet er utelat
- Nedbørsmålingar i Blindern målestasjon er representative for analyseområdet
- Alt nedbør blir betrakta som effektiv nedbør, altså heile nedbørsmengda gjerast om til avrenning

6.3 Studieområde

Nadderud nedbørsfelt ligger i Bærum kommune og er 7,13 km² stort og har utløp sørvest i feltet markert med raud punkt på figur 7. Område er prega av tett busetnad (80%) og skog/grøntareal. Figur 7 viser omsynsområde for flaum i følge SCALGO Live. Nedbørsfeltet har dei siste åra fått auka oppmerksmed grunna problematisk handtering av styrtregn. 6. august 2016 kom det eit nedbørshending av gjentaksintervall 200 år og 19. august 2017 eit 50 års regn (Friborg, 2018). Nyleg, den 7. august 2019 registrerte nedbørsstasjonen Gjenttum høgaste nedbørsverdiar sidan stasjonen blei satt i drift i 1970 for varigheita 30 min, 1 time og 3 timar (Jakob Bork, 2019).



Figur 7: Flaumutsett område illustrert med skravert brunfarge i følge SCALGO Live

Bestemming av konsentrasjonstida for feltet er viktig da dette har innflytelse på simuleringstida. For å få maksimal verdi for vasstand er det viktig at nedbør frå heile feltet rekker å bidra. I samsvar med tidelgare masteroppgåve, vart konsentrasjonstida satt til 2t (Høylye, 2021).

6.4 Terrenggrunnlag

Terrengdata blir ofte generert på grunnlag av laserskanndata fritt tilgjengelig på hoydedata.no, FKB-data, eller innmålinger/skann utført av ein landmålar. Ofte er ein kombinasjon av disse brukt.

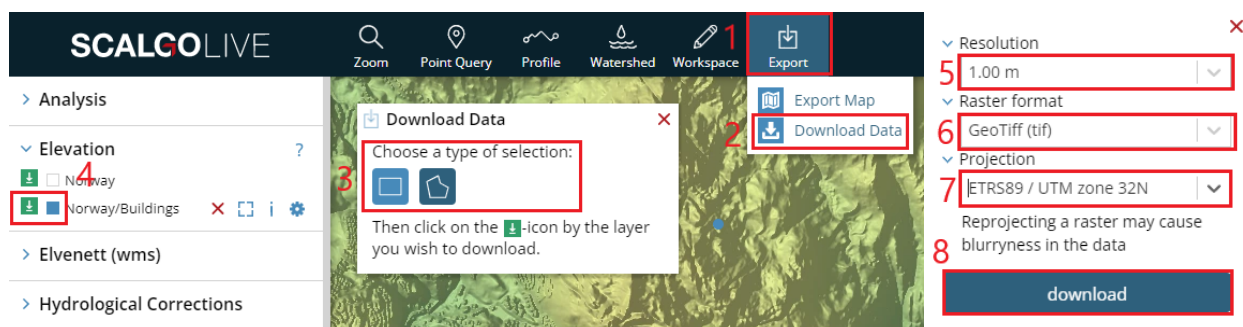
I denne oppgåva er SCALGO Live nytta for danning av justert terrenggrunnlag. Dette er ein vesentleg forenkling av dette steget, fordi terrenggrunnlaget er ferdig justert mht bygg og større bruelement. Forenklinga var vurdert rimeleg fordi verktøy som samanliknast ikkje har spesifikk og enkel funksjonalitet for justering av terreng mht. Bygg. Denne type terrengjustering faller utanfor fokusområdet til oppgåva. Funksjonalitet integrert i verktøya for mindre terrengjusteringar vil bli gjennomgått.

6.4.1 Eksport av terrengdata frå SCALGO Live

Verktøyet SCALGO er eit modelleringsverktøy utvikla av MADALGO ved Aarhus Universitet og Duke universitet, som først blei lansert i Noreg i 2018 (SCALGO, 2018) (SCALGO). Verktøyet gir brukarar moglegheit å framstille dynamiske nedbørsfelt med tilhøyrande dreneringslinjer, framstille konsekvens av styrtregn, fyller forseinkingar i terrenget og teikne profilinjer. Desse analyser utførast på grunnlag av terrengdata levert av kartverket. Terrenget genererast som eit rutenett med 1x1 store celler (SCALGO). Videre er terrengmodellen justert for bygg, ved at terrenget blir løfta 10m for å ta omsyn til byggets grunnflate. Bygningsdata er henta frå Kartverket/Geovekst og heiter FKB Bygning N5. Terrenget er vidare justert for dei største brua og kulvert. Dataa brukt for justeringa er henta frå FKB N20 Vann, Elveg 2.0 og Banenettverk(SCALGO).

I oppgåva blir SCALGO Live nytta for å finne avgrensande polygon for nedbørsfeltet og eksport av justert terrengmodell. Eksport av justert terrengmodell er vist under, og danning av avgrensande polygon er beskrive i kapittel 1.5.1 Avgrensing av Nadderud nedbørsfelt.

Framgangsmåten for eksport av terrengdata frå SCALGO live er vist på figur 8



Figur 8: Framgangsmåten for eksport av terrengdata frå SCALGO Live

Data er basert på digital terrengmodell levert av Kartverket med punkttetthet på 1m. Justering av bygg er utført på grunnlag av data levert av Kartverket/Geovekst frå felles kartdatabase N5 Bygning. Begge grunnlaga er av nyare dato og kan forventast å beskrive terrenget på ein god måte. Informasjon om terrengdata er vist i tabell 1

Organisasjon	Datasekk	Fangstdato
Kartverket	NDH DTM1	2022-04-01
Kartverket/Geovekst	FKB N5 Bygning	2022-04-04

Tabell 1: Informasjon om terrengdata

Eksportformat, vist som punkt 6 på figur 9 må veljast med omhug. Dette fordi GeoTIFF (.tif) format er kompatibel med HEC-RAS, men ikkje kompatibel med MIKE 21. ASCII Gridded XYZ (.xyz) eksportformat blei nytta til MIKE 21. Videre blei UTM sone 32N brukt som projeksjonen i oppgåva.

Bygning blir ivaretatt i terrengdata ved at bygningsflaten blir løfta 10m over terrengoverflaten. Dermed vil også nedbør som faller på bygningsflaten bli ivaretatt i modellen.

6.5 Nedbørsmodellering

Nedbøren som faller i feltet vil ha ein romleg variasjon som ikkje blei tatt høgde for i denne oppgåva. Nedbørsintensiteten i ein nedbørshending vil variere med tiden, der man aldri har to like hendingar. Grunna denne variasjonen vart ein syntetisk nedbør danna. Dei vanlegaste metodane er trekantmetoden, Chicago-metoden og symmetrisk regnhytogram. I denne oppgåva vart sistnemnte metode nytta. Symmetrisk regnhytogram har spissnedbør i midten av hendinga som kan i lengre nedbørshending introdusere feilkjelde, der spissnedbøren ikkje er så tydeleg.

Symmetriske regnhytogram

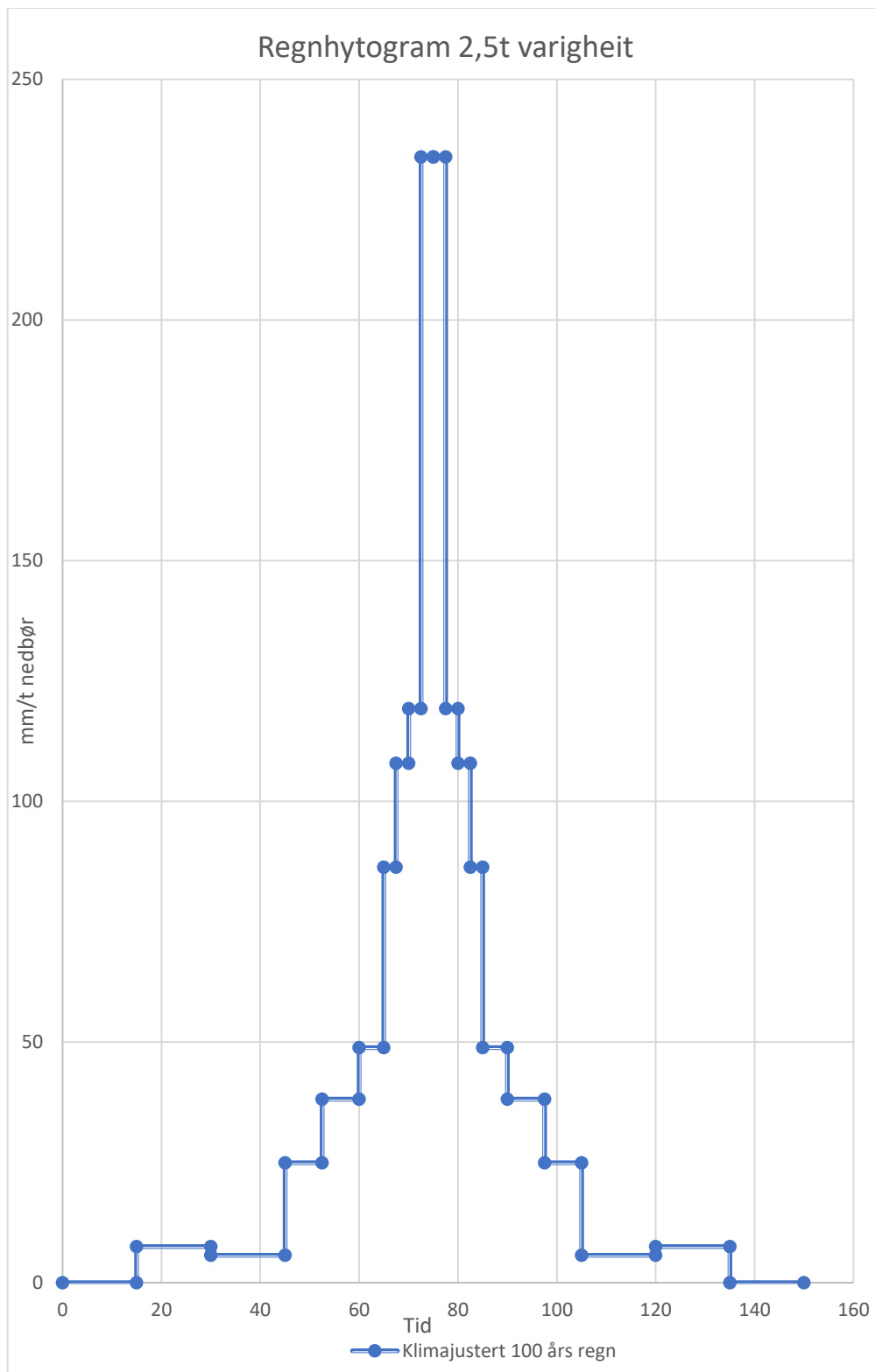
Det symmetriske regnhytogrammet har grunnlag i målingar utført av målestasjonar. Det ligger eit par stasjonar i nærheita åt nedbørsfeltet og ei målestasjon i sjølvne nedbørsfeltet som er av nyare dato. Disse stasjonar har varierende lengde på målingar, med varierende kontinuitet i målingar. Grunna denne usikkerheita, blir målestasjon på Blindern brukt som har meir sikre og lengre måledata. Stasjonen har vore i drift sidan 16.04.1968(Klimaservicesenter). IVF statestikken blei henta frå klimaservicesenter og symmetrisk regnhytogram vart laga på grunnlag av målingar. For å ta høgde for antatt framtidig auke i nedbør, vart ein klimafaktor på 1,4 brukt som vist på figur 9. På grunnlag av tidlegare oppgåve vart konsentrasjonstida for feltet satt til 2t i denne oppgåva (Høylye, 2021). Dette førte til at total lengde på nedbørshending vart på 2,5t der 15min med ingen nedbør vart brukt for start og slutt av nedbørshendinga. Spissen for nedbør som opptreer midt i hendinga er henta frå IVF tabell for 5 min, der dei andre blokka er justert for 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 og 120 min. Fordi finaste oppløysingen på

varighet er på 5 min, var det naudsynt å definere nedbør på minst 2,5 min. Sidan dette ikkje er eit mogeleg val i HEC-RAS, vart oppløysingen justert til 30 sek. Ferdig hytogram er vist på figur 10.

	Dimensjonerende gjentakintervall < 50 år	Dimensjonerende gjentakintervall ≥ 50 år
≤ 1 time	40 %	50 %
>1 – 3 timer	40 %	40 %
>3 – 24 timer	30 %	30 %

Figur 9: Klimapåslag for målestasjon Blindern, hentet frå klimaservicesenter (Klimaservicesenter)

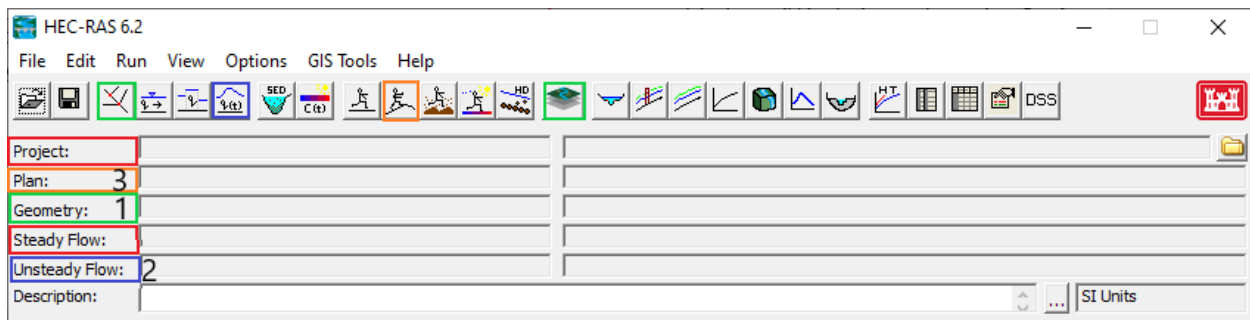
Tid	100 år klima
0	0
15	0
15	7.5096
30	7.5096
30	5.6952
45	5.6952
45	24.8976
52.5	24.8976
52.5	38.1024
60	38.1024
60	48.8376
65	48.8376
65	86.3352
67.5	86.3352
67.5	107.9064
70	107.9064
70	119.2464
72.5	119.2464
72.5	233.856
75	233.856
75	233.856
77.5	233.856
77.5	119.2464
80	119.2464
80	107.9064
82.5	107.9064
82.5	86.3352
85	86.3352
85	48.8376
90	48.8376
90	38.1024
97.5	38.1024
97.5	24.8976
105	24.8976
105	5.6952
120	5.6952
120	7.5096
135	7.5096
135	0
150	0



Figur 10: Regnhytogram klimajustert 100års regn

6.6 Modelloppsett i HEC-RAS

HEC-RAS versjon 6.2 blir nytta for alle simuleringar utført i dette verktøyet. Dette delkapittel er delt i tre deler, der inndelinga er henta frå prosjektmenyen (hovud vindauge til verktøya) til HEC-RAS som vist på figur 11. Dei tre inndelinga er markert med oransje, grøn og blå boks. Project og steady flow er markert med raud boks der project informerer enkelt kva prosjekt ein jobbar i og steady flow er ikkje relevant for denne oppgåva. Desse vil ikkje gjennomgåast i meir detalj.



Figur 11: Prosjektmenyen til HEC-RAS

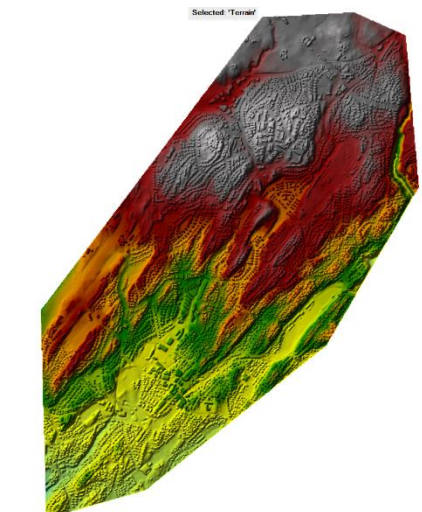
Først vil geometri (Geometry) gjennomgåast etterfylgt av ikkje stasjonær strøyming (Unsteady flow) og sist vil danning av simuleringsplan (Plan) beskrivast. Øvst på vertøylinja er knappane for definisjon av disse delane markert med same farge. Sist vil presentasjonsmogelegheita til resultat gjennomgåast.

6.6.1 Geometri

Med geometri meinast det først og fremst all fysisk geometri som legger føringar for strøyming, som terrengmodell, kulvert, bygg, bru osv. Videre vil geometri også omfamna romlege eigenskapar, som mannings n tall, infiltrasjonslag, lag for transport av sediment og lag for permeabilitet. Resultat blir også presentert i form av stasjonære eller dynamiske punkt, linjer eller polygon.

Terrengmodell

Etter terrengdata blei eksportert frå SCALGO Live, importerast data direkte inn i HEC-RAS. Detaljert framgangsmåte for import av terrengdata er beskrive i HEC-RAS dokumentasjon. Ferdig importert .tif terrengfil er vist på figur 13



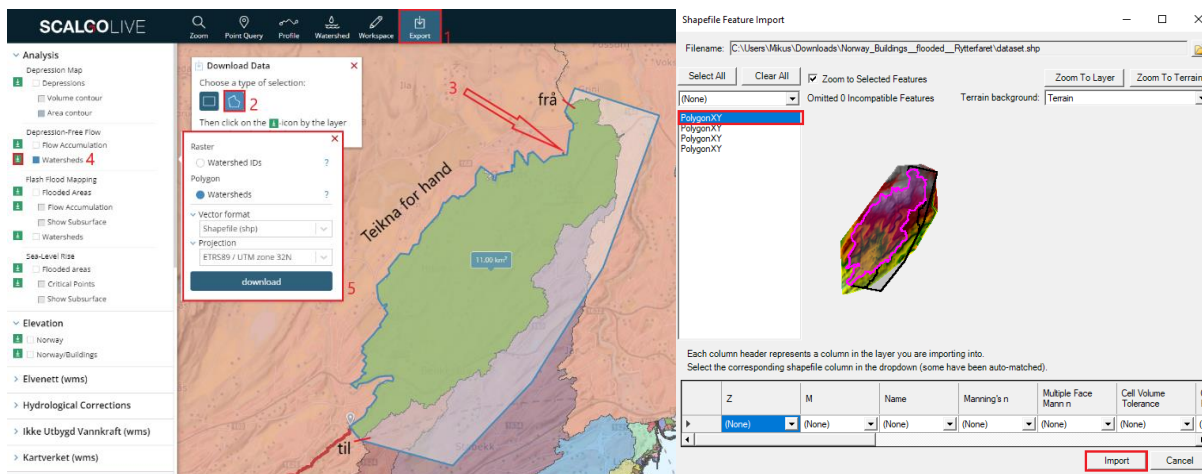
Figur 12: Terrenghmodell i HEC-RAS

For å inspisere at bygga er justert, kan musepeikar holdast over terrenget mens terrenghaget er markert.

Avgrensing av Nadderud nedbørsfelt

Neste steg er å definere område der hydrodynamikken skal analyserast. Dette gjerast ved å definere 2D Flow area under geometrilag i RASMapper. Her er det mogeleg å definere avgrensing ved å teikne ut avgrensande polygon med fri hand eller ved å importere ei Shape fil med ferdig polygonisert område.

For å avgrense bruken av fleire verktøy, blei SCALGO Live brukt til å eksportere avgrensing av nedbørsfeltet. Avgrensinga i SCALGO Live vart utført delvis med fritt hand og delvis av verktøyet. Framgangsmåten er vist på figur 14.



Figur 13: Danning av avgrensande polygon i HEC-RAS

Sidan nedbørsfeltet Nadderud er del av eit større nedbørsfelt, blei venstre/vest side avgrensa ved å teikna over grensa for nedbørsfeltet for hand. Mot høgre/aust hadde nedbørsfeltet definerte grenser. Frå-til viser område der nedbørsfeltet blei definert for hand, sjå figur 14. Dette kan gjerast meir presist ved å anvende GIS verktøy, men denne framgangsmåten vart for denne oppgåva vurdert som tilstrekkeleg. I RASMapper blei eksportert shape fil importert ved å høgreklikke på Geometries > Add new geometry > høgreklikk på 2D Flow areas i den nye geometrien > Edit geometry > høgreklikk på perimeters > Import features from shape file. Når dialogen for import blei open, vart avgrensingspolygonen markert og importert som vist på figur 14.

Justering av terrengmodell

Eksportert terrenggrunnlag frå SCALGO Live er allereie justert for større brukonstruksjonar, men ikkje for mindre kulvert eller kanal. I oppgåva blei terrenget justert vidare mot mindre kulvert på grunnlag av hydrological corrections data henta frå SCALGO Live. Disse justeringar består av linjer som viser vegar for strøyming med korrekt høgde. Etter at justeringslinjene vart eksportert frå SCALGO Live blei disse importert inn i justeringslaget til terrenget i HEC-RAS ved å høgreklikke på terrenlaget og velje Add new modification layer > Lines > Channel. Videre måtte parameter for justering definerast. Parameter for botn bredde (definert i HEC-RAS som top width) og helling på sidekantane blei lagd inn som vist på figur 15

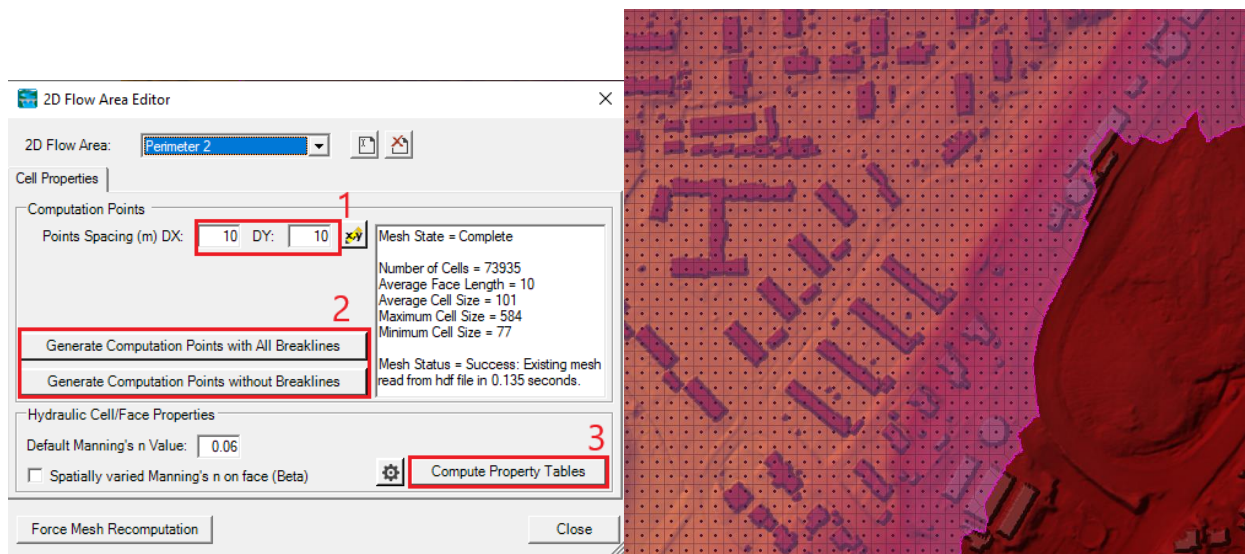
FID	Name	Elevation Type	Top Width	Left Slope	Right Slope	Max Re.
0		TakeLower	2	1	1	100
1		TakeLower	2	1	1	100
2		TakeLower	2	1	1	100
3		TakeLower	2	1	1	100
4		TakeLower	2	1	1	100
5		TakeLower	2	1	1	100
6		TakeLower	2	1	1	100
7		TakeLower	2	1	1	100
8		TakeLower	2	1	1	100
9		TakeLower	2	1	1	100
10		TakeLower	2	1	1	100

Figur 14: Parameterbeskriving for terrenginngrep

Det er også mogeleg å definera justeringselement ved å teikna disse ut med fritt hand. Dette er nærmare beskrive i brukarmanual for RAS Mapper.

Danning av berekningsnett

For å kunne utføre hydrodynamiske berekningar på terrenget, må ein berekningsnett definerast først. Tettheita på berekningsnett skal vere ein variabel i sensitivitetsanalyse. Denne definerast ved å høgreklikke på redigerbar perimeters under 2D flow area og velje edit 2D area properties. Definisjon av tettheita til berekningsnett vart gjort som vist i punkt 1, generering av dette nettet som vist i punkt 2 og danning av eigenskapstabellar i punkt 3 vist på figur 16xx.



Figur 15: Danning av berekningsnett i HEC-RAS

Ved å dobbeltklikke på avgrensingspolygonet kan punkt enkelt leggast til/slettast eller flyttast. I sensitivitetsanalyse skal flaumvegar og flaumutsett område danna på grunnlag av innledane berekning leggast inn med finere tettheit. Dette for å sjå om ei slik justering gir eit betre strøymingsbilete for modellen.

Importert polygon for feltavgrensing har rutenett på ein meter. Dette fører til at polygonen har punktavstand på 1m fleire steder, noko som er alt for tett og kan føre til problem i danning av berekningsnett. Det vart enkelt løysast ved å nytte funksjonen exploded polygons ved å høgreklikke på perimeter laget og velje export layer. Her vart polygonen forenkla til 250 punkt ved å bruke Douglas-Peucker-Ramer metode. Utsnitt av original polygon er presentert med lilla farge og redigert er presentert med grøn på figur 17.



Figur 16: Illustrasjon av før (magenta) og etter (grøn) redigering av avgrensande polygon

Brotlinjer og detaljert strøymingsområde brukast ved kritiske område i modellen. Brotlinjer brukast ofte for å definera hinder for strøyming. Dette kan til dømes vere kanal, veg eller konstruksjon. Videre kan detaljert strøymingsområde brukast for å sørgje for presise kalkulasjonar der mest strøyming skjer. Dette er viktig når hastigheita variere fort, større nett fører til lekkasje eller danning av øyer. I denne oppgåva skal brukast i sensitivitetsanalysen.

Grensevilkår

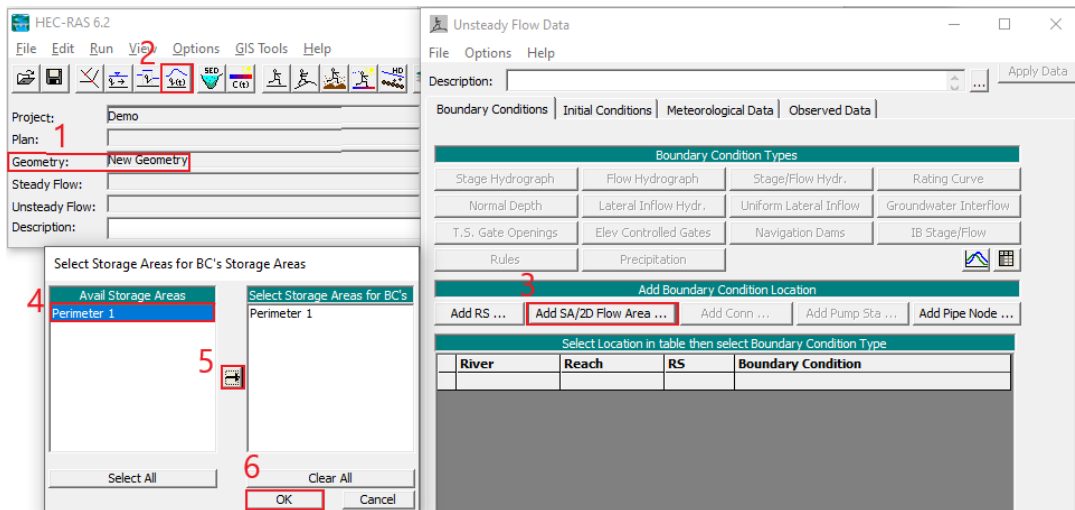
I denne oppgåva vart det brukt grensevilkår ved nedbørsfeltets utløp. Denne vart definert som normal djupe for å sørgje for at vatn kan forlate nedbørsfeltet. Nedbør blei lagt inn utan romleg variasjon, men med tidsvarierte regnhytogram. Grensevilkår for utløp vart definert som boundary condition line i RASMapper.

6.6.2 Ikkje stasjonær strøyming

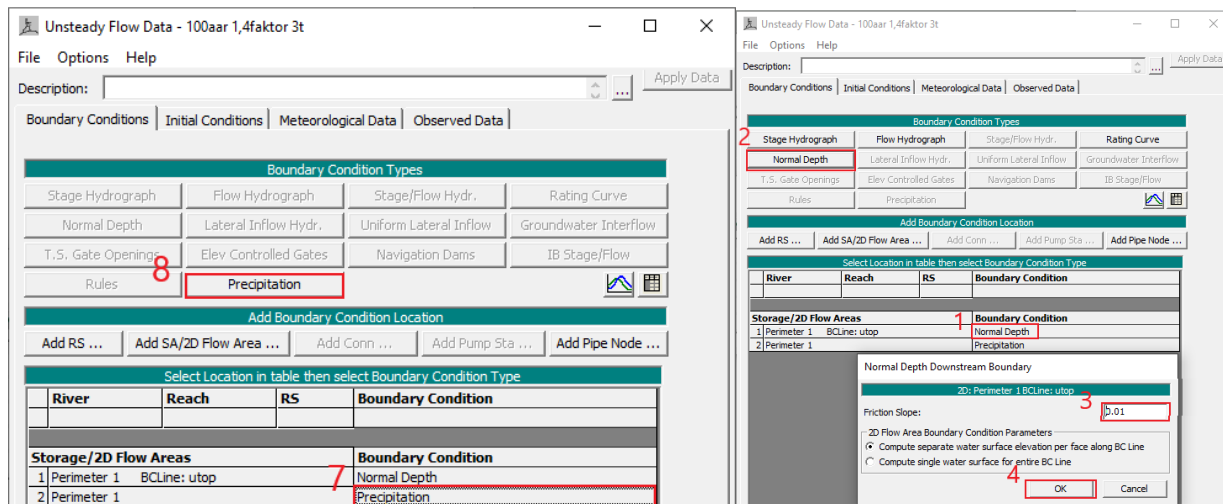
Etter definisjon av geometri vart strøymingsforhald definert. Fordi oppgåva dreier seg om 2D strøyming, var det ikkje stasjonær strøymingsforhald som var relevant. Her vart start og grensevilkår definert for simuleringa. Desse vilkår er like for alle simuleringar og inneheldt tidsvarierte nedbørsmøllering og utløpsvilkår søraust i feltet. Definisjon av desse vilkår er nærmare vist under.

Grensevilkår

I dialogen for ikkje stasjonær strøyming vart grensevilkår for strøymingen beskrive. I denne oppgåva vart nedbør beskrive ved ein regnhytogram og utløp nedstrøms nedbørsfeltet ved normal djupe. Nedbør vart lagt inn etter at geometrien var definert i prosjektmenyen. Framgangsmåten er vist på figur 18.



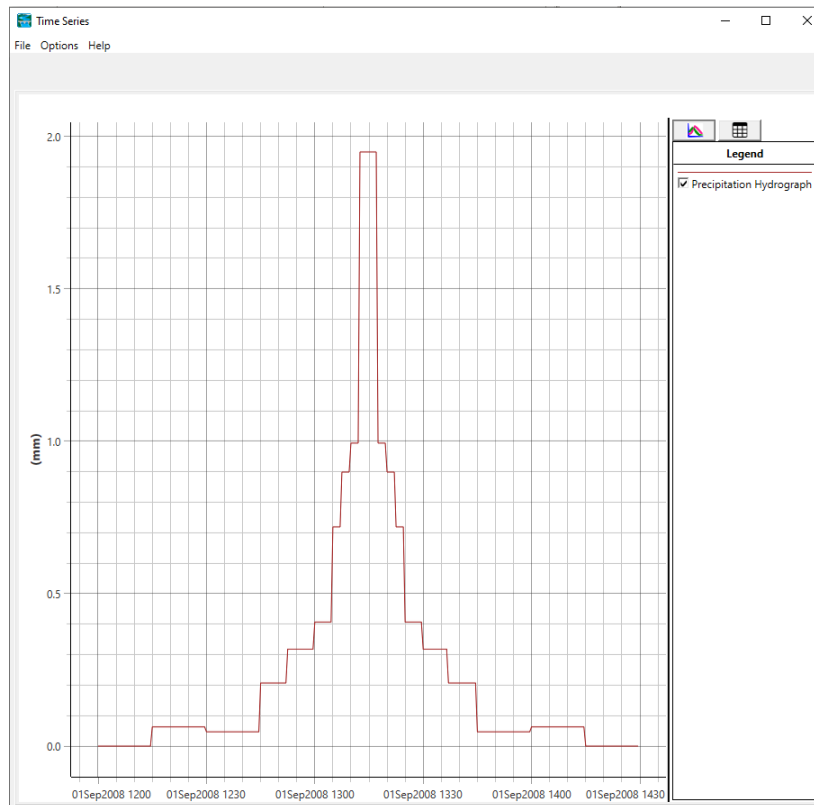
Figur 17: Oppretting av kopling til berekningsnett definert i geometrikapittelet



Figur 18: Definisjon av nedbørvilkår (venstre) og utløpsvilkår (høgre)

Symmetrisk regnhytogram

Danning av regnhytogram er beskrive i kapittel 6.5. Sidan HEC-RAS ikkje har tidssteg på 2,5min blei tidssteget satt til 30s. Dette førte til at nedbørsmengd måtte justerast for det nye tidssteget. Figur 20 viser justert regnhytogram til 30s tidssteg og eining mm nedbør.



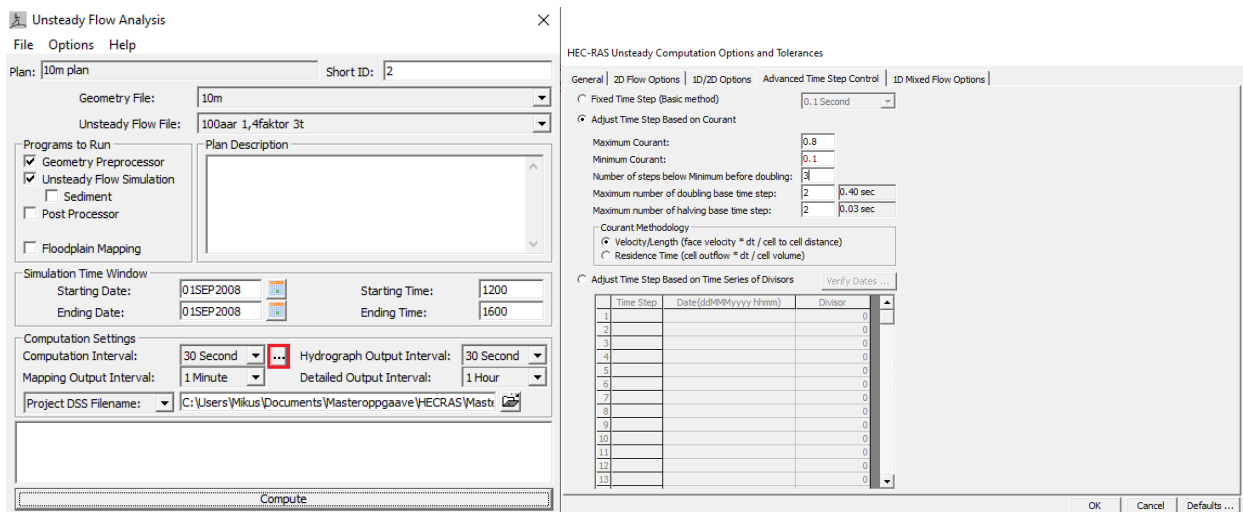
Figur 19: Symmetrisk regnhytogram i HEC-RAS. Y-aksen har eining mm og dato på X-aksen er irrelevant

6.6.3 Simuleringsplan

Simuleringsplan definerer regel for sjølv simuleringa. Dei viktigaste reglane for oppgåva er definisjon av type program som skal køyrast, tidssteg for resultatframvising, tidssteg for berekning, val av geometri og strøymingsvilkår, val av likningssett og type løysings skjema (direkte eller iterativ). Desse vil i stor grad bli uendra for dei forskjellige simuleringar, forutan når dei skal endrast enkeltvis for å sjå om dei påverke tidsbruken i sensitivitetsanalysen.

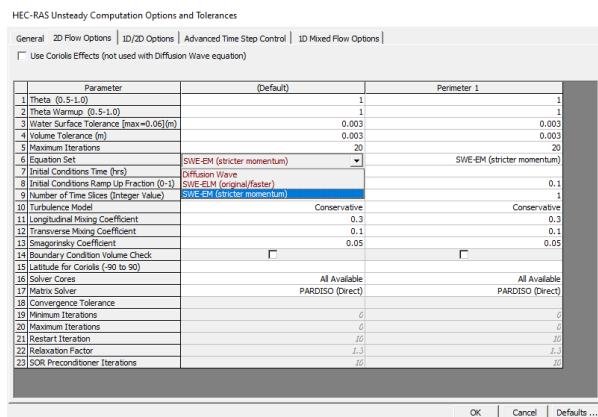
Dialogen for simuleringsplan aktiverast ved å klikke på oransje boks vist på figur 11. Dialogen for definisjon av nedbør er vist på figur 19. Planen vart definert ved å velje geometri fil og ikkje- stasjonær strøymingsfil øvst. Videre vart type analyse valt (Programs to run). Så vart simuleringstida definert, der dato for denne oppgåva er ikkje relevant. Sist blei berekningsmessige innstillingar valt.

Computation interval vart satt til 30 sekunder i utgangspunkt for simulering, men blei endra etter plotting av courant nummer i resultat lag. Videre var også variabel tidsintervall brukt i sensitivitetsanalyse for å sjå om dette minkar berekningstida eller gjere modellen meir stabil. Innstillingar for avansert tidssteg redigering er å finne ved å klikke på tre prikkar til høgre for computation interval vist på figur 21 med raud boks.



Figur 20: Definisjon av strøymingsplan (venstre) og avanserte innstillinger (høgre)

Mapping output interval styrer oppløsningen til resultat presentasjonen. Mindre intervall gir flere steg i den dynamiske framvisingen av resultatene og større intervall gir høvesvis færre steg. Hydrograph output interval bestemmer tidssteg for eventuelle brukardefinerte punkthydrograf, noko som ikkje er relevant for denne oppgåva.



Figur 21: Definisjon av avanserte innstillinger med illustrasjon av 3 moegelege val for likningssett i nedtrekksmenyen

Detailed output interval kan skrus på og av ved å huke av på post processor under programs to run. Fordi analyseområdet består berre av 2D område, vil ikkje post prosessering køyrast fordi danning av detaljerte variabel ikkje er moegeleg.

Under 2D flow options for avanserte innstillinger vart likningssettet for berekningar valt. Her blei dei tre tilgjengelege likningssett samanlikna med standardverdi for turbulens for gitte likningssett. SWE-ELM er forkorting for Eulers-Lagranges metode og SWE EM for Eulers metode.

Planenkøyrast ved å trykke på compute. Dette opnar eit nytt vindauge der simuleringsforløpet er beskrive.

6.6.4 Presentasjon og resultatredigering

Når simuleringsplanen er ferdig med berekningar, kan resultat presenterast i RASMapper. Det blir automatisk generert 3 dynamiske lag – vassdjup, vasshastigheit og høgde på vasstand. I HEC-RAS kan laga enten vere dynamiske eller statiske, der dei dynamiske resultatlaga ikkje er låst til eit tidssteg. Dynamiske resultatlaga kan ytterlegare supplerast med particle tracking og static velocity arrows som vist på figur 58 i vedlegg 2. Fleire dynamiske og statiske kart kan opprettast ved å høgreklikke på resultatlag og velje create a new result map layer. Eit døme på korleis oppretting av dynamisk kart over courant nummer vises på figur 59 i vedlegg 2.

Det er fleire programdefinerte karttype som kan opprettast for både dynamisk og statisk framvising. Valet om dynamisk eller statisk resultatvisning skal gjerast ved å enten velje in memory for dynamisk kart eller saved to disk for statisk kart under map output mode. Er desse programdefinerte resultatlag ikkje tilstrekkeleg, har HEC-RAS ytterlegare funksjonalitet for oppretting av kalkulerte resultatlag. Desse laga opprettast ved å høgreklikke på overordna planresultat og velje create a new calculated layer. Begge val er vist på figur 60 i vedlegg 2. I danning av kalkulert resultatlag står modellør fritt i å definere laget ved hjelp av skript språka C Sharp og Visual Basic. Eksempelskript er å finne under nedtrekksmenyen Script, vist på figur 60 i vedlegg 2.

I denne oppgåva blei både programdefinerte resultatlag for flaumutbreiing og kalkulert lag for samanlikning av vasstand og hastigheit brukt.

3D presentasjon

3D visning i HEC-RAS gjere det mogeleg å vise både utgangsdata som terreng og resultatdata etter simuleringar i 3 dimensjonar. Dette er eit godt illustrasjonsverkemiddel, som kan utheve problemområde på ein ny måte. I denne oppgåva vart denne funksjonen brukt for å inspisere terrenget og strøymingsbilete. Aktivering av 3D visning skjer ved å høgreklikke på laget som skal vises i 3D og velje view result in 3D. For å ytterlegare gjere presentasjon av resultat tilgjengeleg, kan resultatlag eksporterast til KML som er Google Earth filformat. Her kan polygonisert/statisk resultatlag eksporterast både til KML 2D og 3D, for så å bli vist i google earth. Eksempel på ei flaumområde eksportert til KML 3D er vist på figur 61 i vedlegg 2. På ein slik måte vil resultatfil vere uavhengig av HEC-RAS og vere lettare tilgjengelege for aktørar som ikkje brukar HEC-RAS. Presentasjon av resultat i KML 3D vil nyttast i resultat kapittel.

Presentasjonsoppsett

Data i HEC-RAS kan presenterast ved hjelp av forskjellige visualiseringsregler. Desse er å finne ved å høgreklikke på lag av interesse og velje layer properties. Her kan visualisering av vektordata som punkt, linje og polygon endast, sjå figur 62 i vedlegg 2. Opacity viser kor transparent eit lag skal vere. Dette er aktuelt når fleire lag presenterast over kvarandre. Transparent lag vart brukt for framvising av flaumutbreiing i resultatkapittel (figur 38) og endring av presentasjonsreglar vart brukt for å utheve nedbørsfeltet og lage fargeskala for presentasjon av resultat.

6.7 Modelloppsett i MIKE 21

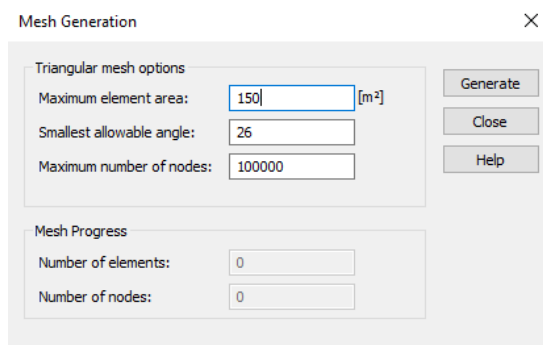
Verktøyet MIKE ZERO med modulen MIKE 21 Flow Model FM vart brukt for å beskrive flaum i nedbørsfeltet Nadderud ved hjelp av flexible mesh terrengframstilling. Da MIKE leverer betalingsverktøy blei lisens for bruken av MIKE 21 Flow Model FM mottatt frå Christian Almestad ved DHI. I det vidare vil kapittelet bli delt opp i to underkapittel for å beskrive arbeidsflyten i danning av hydraulisk modell i MIKE 21 FM. Først vil danning av terrengområde med grensevilkår bestemast for det MIKE 21 kallar domain. Deretter vil variabel i den hydrodynamiske modulen bestemast.

6.7.1 Domain

Domain er det MIKE 21 kallar terrengområde for modellen. Fordi fleksibel mesh (triangelnett) vart brukt for å framstille terrenggrunnlag, måtte triangelnettet først lagast i mesh generator. Terrengavgrensing og terrengdata blei definert i mesh generator. I denne oppgåva var terrengavgrensinga frå HEC-RAS eksportert for så å bli brukt i MIKE 21. Dette for å sørge for lik feltavgrensing i begge verktøy. Import av feltavgrensande polygon gjerast ved .xyz format. Avgrensingslinja kunne ikkje eksporterast direkte til dette formatet frå verken SCALGO Live eller HEC-RAS. Derfor blei avgrensingslinja eksportert i Shape format frå HEC-RAS for så å bli transformert til .xyz format av GIS verktøyet Shp2Xyz i MIKE Zero Toolbox. Den nye .xyz fila blei vidare importert i mesh generator ved å gå til Data > Import Boundary ... Den importerte avgrensingslinja har punktavstand på 1m grunna tettheita på terrenggrunnlaget i HEC-RAS. Dette er unødvendig tett. For å slette unødvendige punkt og auke punktavstand på linja blei funksjonen clean brukt med minste avstand mellom noder på 15m. Funksjonen er å finne under nedtrekksmenyen Data.

Som beskrive tidlegare måtte terrengdata eksporterast frå SCALGO Live i .xyz format for bruk i MIKE 21. Denne fila blei lagt inn som scatter data under Data > manage scatter data. Videre blei flexible mesh definert ved å gå til Mesh>Generate Mesh og velje maximum element area for å definere kor store

triangla i mesh skal vere, smallest allowable angle for to av triangellinja og maksimum tall på noder i mesh. Desse vala er vist på figur 22. Etter at det fleksible meshet vart danna, vart den analysert for courant tall. Dette blei gjort ved å gå til Mesh>Mesh editing. Her blei problemtriangel som fører til lave tidssteg lista opp. Desse blei vidare redigert ved hjelp av mesh redigeringsverktøy for å auke areal på problemtriangel. Etter ferdig redigert mesh fekk nodane i meshet ei høgde frå scatter data. Dette blei gjort ved å velje Mesh > Interpolate... Etter at triangelnettet blei supplert med høgdedata blei ferdig triangelnett eksportert ved å velje Mesh > Export Mesh... Dette triangelnettet er nå i stand til å bli brukt som domain for MIKE 21 modell.



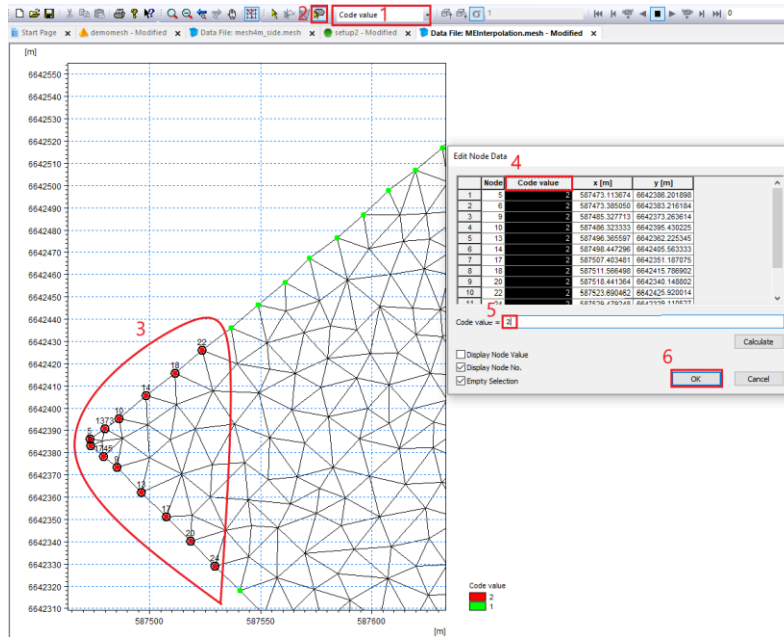
Figur 22: Danning av fleksibel mesh

Terrengjustering

Fordi terrengdata eksportert frå SCALGO Live er berre justert mot bygg og store brukonstruksjonar, måtte terrengdata supplerast med justeringsfil, sjå kapittel 6.6.1 justering av terreng. Denne fila vart importert som scatter data i MIKE Mesh Generator for så å bli konvertert til linjer. Desse vart vidare brukt i generering av triangelnett. Dette førte til at triangelnettet tok omsyn til desse linja og plasserte berekningsnodar på importerte linjer. Videre vart HEC-RAS brukt for å finne høgde for desse justeringslinjene. Denne høgda vart lagt inn som scatter data i MIKE 21 langs desse linjene. Dette vart utført manuelt.

Grensevilkår

Det er viktig å ha kontroll på grensevilkår, der grense blir automatisk satt som land boundary (lukket land grense). I denne oppgåva har feltet eit utløp i sørvest. Denne blei definert som ei separat grense for dette formål. Utløpsgrensen blei definert ved å opna .mesh fila for så å velje code value øvst. Framgangsmåten er vist på figur 23.



Figur 23: Framgangsmåten for definisjon av utløpsgrense

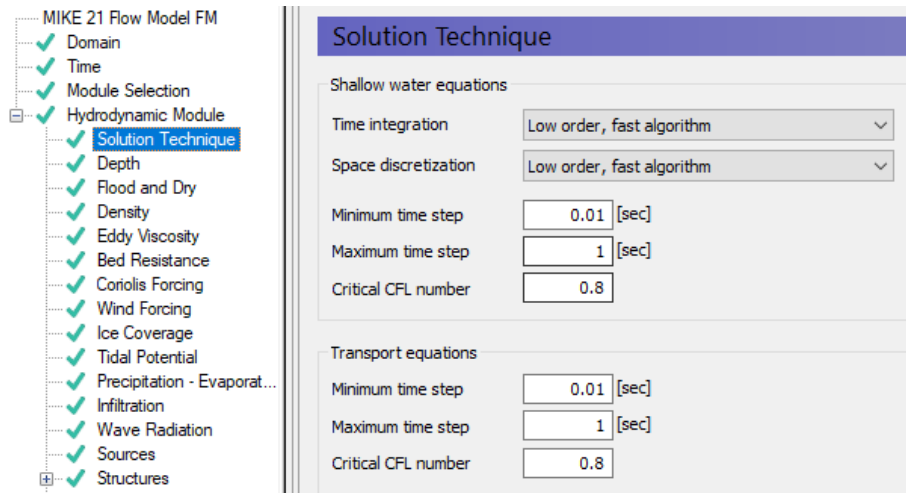
Når .mesh fila veljast i domain kan namnet på grensa endrast i fane for boundary names under domain. Sjølve vilkår for grensa blir definert i boundary condition under hydrodynamic module. Her blei free outflow valt for grensevilkår ved utløp.

6.7.2 Hydrodynamisk modul

I denne oppgåva blei berre hydrodynamisk modul brukt i simuleringar i MIKE 21. Det er mogeleg å velje fleire modular under module selection, men for denne oppgåva er disse ikkje relevante.

Solution technique

Parameter under solution technique har stor betydning for simulering. I nedtrekksmenyene for time integration og space discretization kan valet gjerast angående kva algoritme skal brukast for å løyse grunt vatn likningane. Her vart low order, fast algorithm brukt for å gi eit førsteinntrykk for strøymingsbilete og higher order brukt i sensitivitetsanalyse for å sjå på korleis dette påverkar modellen. Videre vart minimum tidssteg satt til 0.01 og maksimum tidssteg satt til 1.



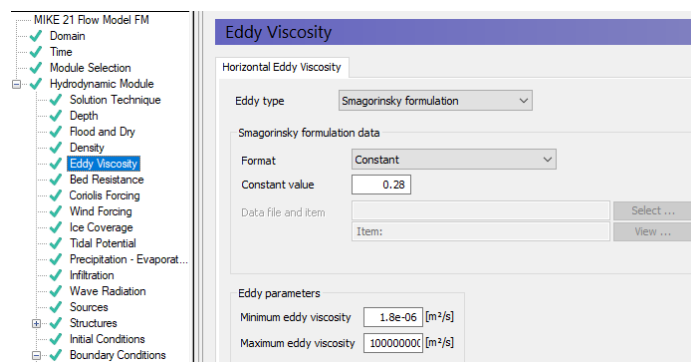
Figur 24: Innstillingar for tidssteg og val av likningssett i MIKE 21

Flood & Dry

Flood & dry (flaum og tørr) er parameter som bestemmer når gitte celler skal inkluderes i beregninga. Her er anbefalte verdi: 0.002 for drying depth og wetting depth 0.003m, som også vart nytta i oppgåva. I forhold til HEC-RAS er denne tilnærming annleis fordi HEC-RAS har som regel større beregningsceller som i seg sjølv ikkje har noko høgde men brukar eigenskapstabellar til å bestemme hydraulikken. Dette resulterer i at meste parten av beregningscellene i HEC-RAS er delvis våte, noko som ikkje er nødvendigvis tilfelle i MIKE 21.

Eddy Viscosity

Eddy viscosity (virvel viskositet) var definert i denne oppgåva ved Smagorinsky formulering med verdi gitt på figur 25.



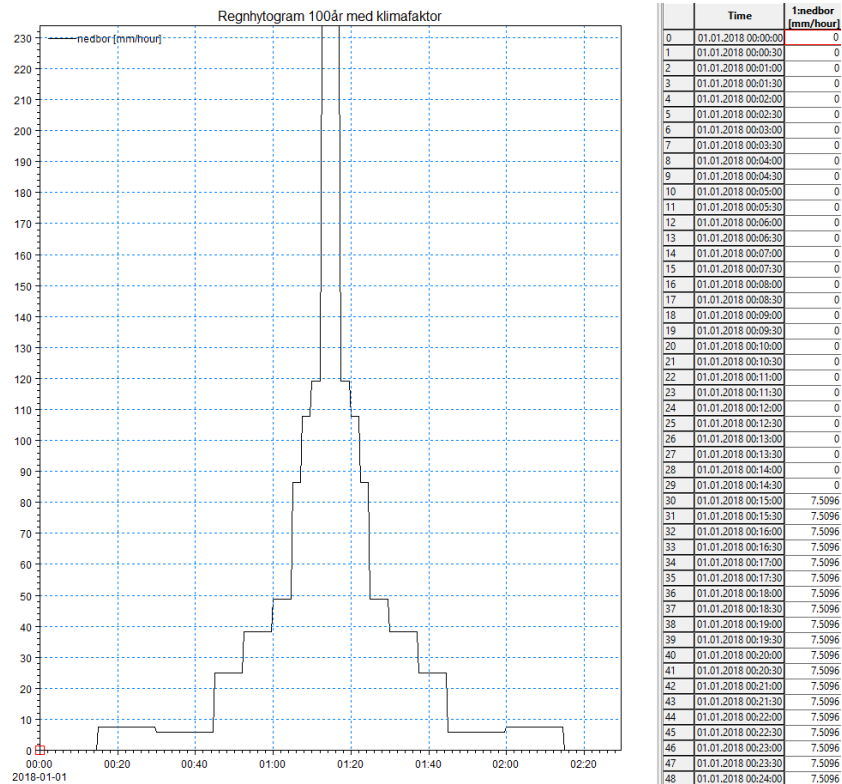
Figur 25: Oppsett for viskositet

Bed Resistance

Friksjon mot bakken var i denne oppgåva definert som konstant mannings tall på 32.

Precipitation – Evaporation

Nedbøren i denne oppgåve er modellert som symmetrisk regnhytogram og er nærmere omtalt i kapittel 6.5. Regnhytogram i MIKE 21 er definert med 30s tidssteg og har eining mm/time, som gjere at verdiane er 120x større enn dei som blir brukt for HEC-RAS der verdien er mm. Regnhytogram er illustrert på figur 26.



Figur 26: Symmetrisk regnhytogram i MIKE 21

Output

Under output definerast type resultat. I denne oppgåve skal areal output definerast for å vise strøymingsbilete for heile felt. Videre vil punkt av interesse definerast i sensitivitetsanalyse for å gi grunnlag for samanlikning i kritiske punkt.

Time

Simuleringsstart og slutt blir bestemt ved å velje Time og leggje inn verdi for tidssteg, kor mange tidssteg simulering skal bestå av og startdato. Her var det viktig å sørge for at simuleringstida samsvarer med

tidsperioden i nedbørssimulering. I denne oppgåve blei 30s tidssteg brukt for resultatframstilling med 299 tidssteg. Dette gav ein 2,5t lang simulering.

6.7.3 Simulering & Resultatpresentasjon

Simulering blir starta ved å velje Run > Start Local Simulation. Standardoppsett vart brukt for alle simuleringar.

6.8 Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalyse blei utført for å sjå korleis parameterjustering påverke resultat levert av HEC-RAS og MIKE 21. Parameter av interesse var tettheit på berekningsnett, bruk av detaljområde, bruk av Mannings lag, berekning ved full grunt vatn likning eller forenkla versjon. Parameterjustering utført i denne oppgåve er lista opp på tabell 2.

	HEC-RAS				MIKE 21			
Tettheit på berekningsnett	100m	50m	20m	10m	100m ²	60m ²	30m ²	15m ²
Med detaljområde	20m	10m	4m	2m	50m ²	30m ²	15m ²	10m ²
Varierte Mannings verdi	x	x	x	x				
Full moment likn.	x	x	x	x		x	x	
Forenkla likning	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabell 2: Variabel for sensitivitetsanalyse

Tettheit på berekningsnett

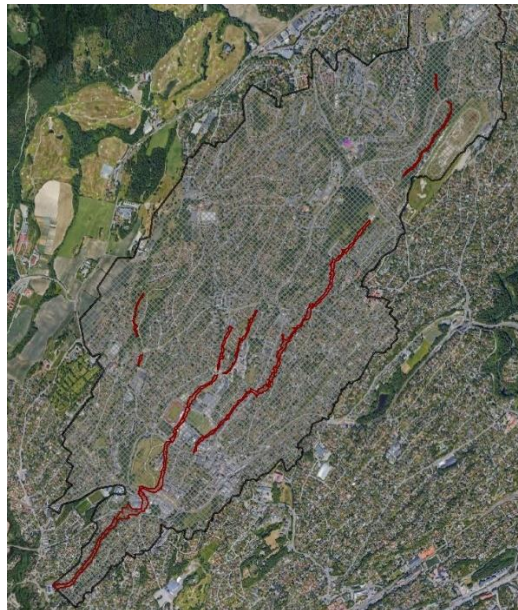
Tettheit på berekningsnett påverke simuleringstida og presisjon av resultat i stor grad. Berekningsnett henge i stor grad saman med definisjon av tidssteg der forholdet er gitt av courants tall. I oppgåva vart berekningsnett satt til å variere frå 100m til 10m for HEC-RAS og 100m² til 15m² for MIKE 21 med og utan detaljområde. Detaljområde vart danna på grunnlag av resultat gitt ved 20m stort berekningsnett i HEC-RAS.

Detaljområde

I sensitivetsanalysen vart detaljområde brukt for å gi tettare berekningsnett i områder der mesteparten av strøyminga skjer. Detaljområdet blei funnet ved å køyre modellen med 20m tett berekningsnett i HEC-RAS for så å bruke resultat til bestemming av detaljområde. Som beskrive i kapittel 6.6.1 er det mogeleg å nytta detaljområde for å definere eit område med tettare berekningsnett og sørge for at celleveggene er parallelle med retninga på straumen. Formålet med denne analysen er å sjå om bruken av disse detaljområda gir gode resultat på elles grov berekningsnett og på denne måten minke simuleringstida. Det finnest andre verktøy som kan bestemme desse områda ved mindre tidsbruk (omtalt i kapittelet 5.1.5 (GIS)).

Detaljområde HEC-RAS

Danning av detaljområde i HEC-RAS vart utført ved å simulere klimajustert 100års nedbør på eit berekningsnett på 20m og 1s tidssteg. Etter fullført simulering blei eit resultatlag danna for hastighet*djupe - utsette område. Polygon i dette laget vart vidare forenkla for å sørge for enklare generering av berekningsnett. Terskel for å definere kritisk område er satt til $0,4\text{m} = \text{dybde} * \text{hastighet}$ på grunnlag av anbefaling gitt av NVE (Noregs vassdrags- og energidirektorat, 2022). Forenkling av resultatlaget blei utført ved same metode som beskrive for forenkling av avgrensande polygon. Endeleg justering vart utført ved manuell redigering av spisse kantar og smale område. Oversikt for detaljområde (raude polygon) er vist på figur 27.

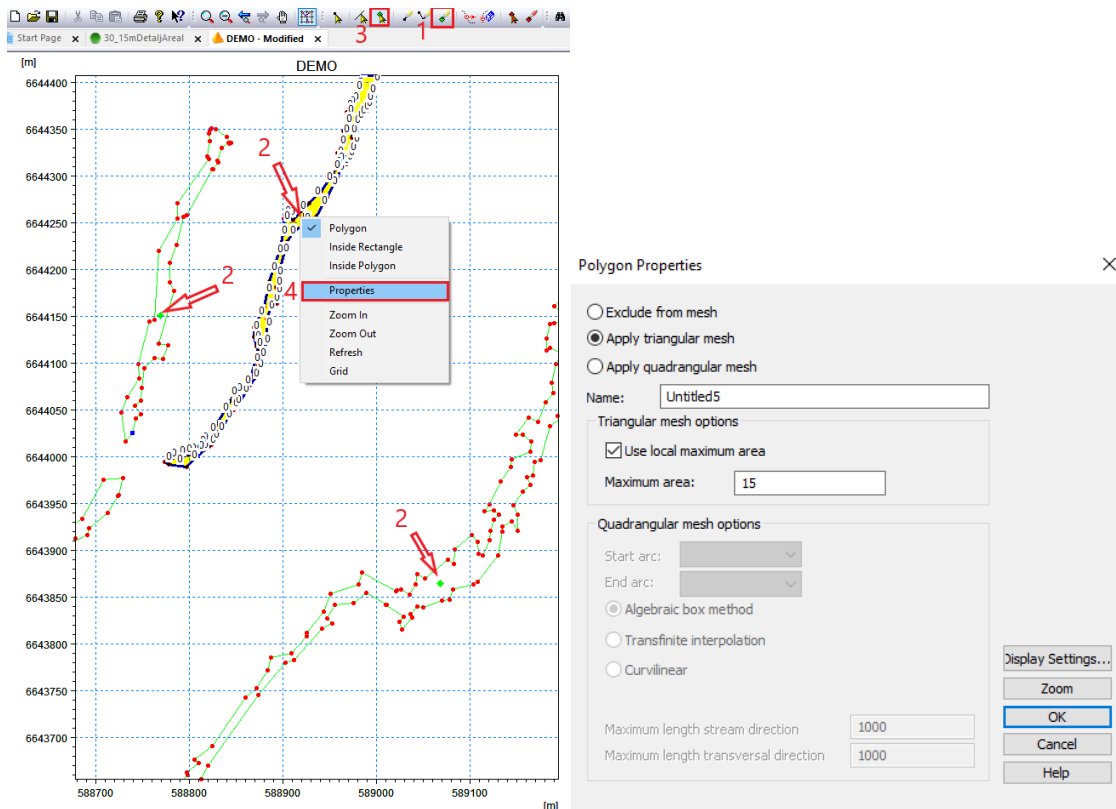


Figur 27: Detaljområde illustrert med røde polygon i HEC-RAS

Detaljområde MIKE 21

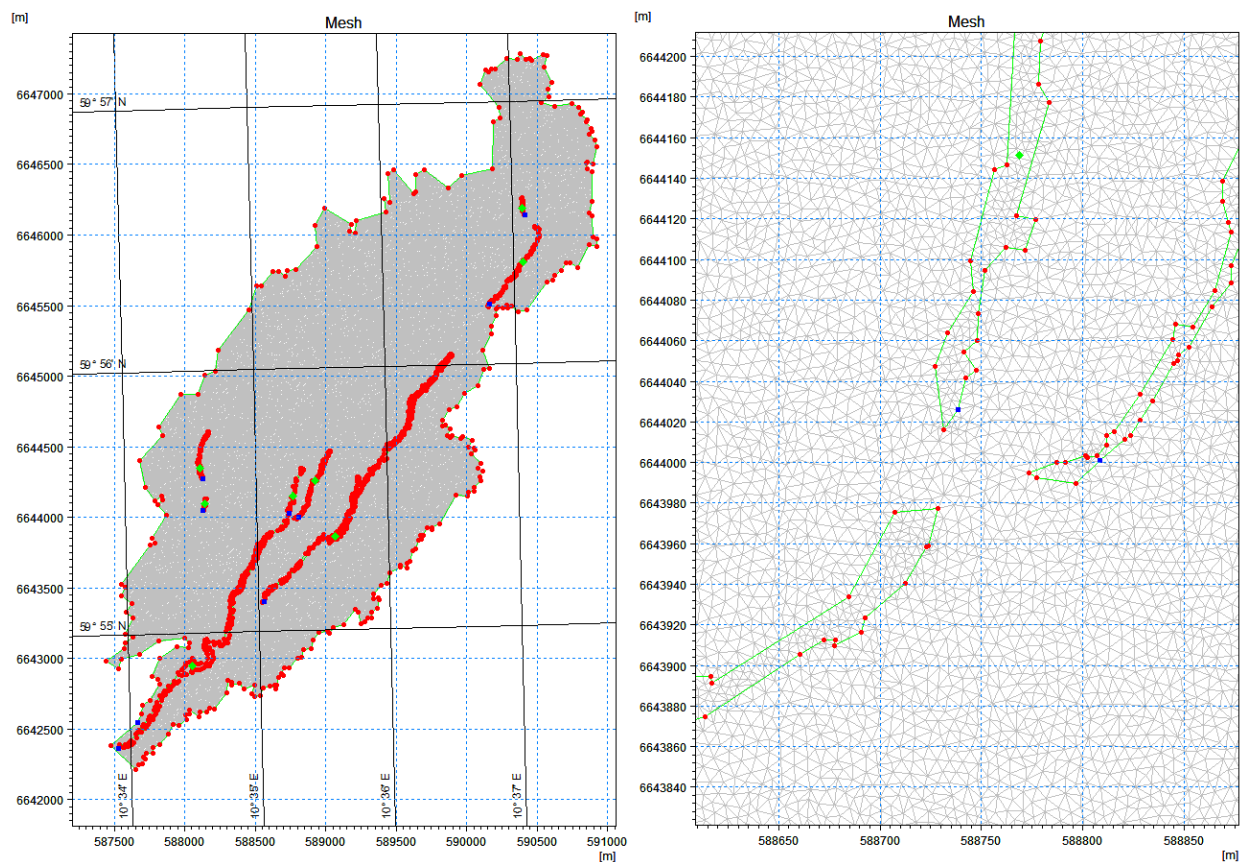
Detaljområdene i MIKE 21 vart henta frå HEC-RAS, for å sørgje at begge verktøy har mest mogeleg like forutsetningar for simulering. I HEC-RAS blei polygon for detaljområde eksportert til separate shape fil for kvar detaljområde. Totalt blei 8 detaljområde eksportert. For å kunne importere fila i MIKE 21, må filane gjerast om til ei .xyz fil. Dette er beskive i kapittel 6.7.1. Når detaljområde blei gjort om til .xyz format vart dei importert i mesh generator ved å velje Data > Import Boundary.

Videre blei disse importerte detaljområde definert som polygon i MIKE 21. Framgangsmåten er vist på figur 28. Steg 1 og 2 viser korleis polygon vart definert og steg 3 og 4 viser korleis vindauge for polygon eigenskapar vart opna. Figur 28 viser eigenskapar for detaljområde på 15m^2 , som også vart brukt i denne oppgåve.



Figur 28: Definisjon av detaljområde i MIKE 21

Figur 29 viser generert berekningsnett i MIKE Mesh generator med detaljområde henta frå HEC-RAS. Her er maks størrelse for areal satt til 30m^2 for feltet generelt og detaljområde areal satt til 15m^2 . For å betre berekningsnett, kan funksjonen Smooth mesh under Mesh nedtrekksmeny brukast. I denne oppgåva vart funksjonen Smooth mesh brukt med 10 iterasjonar.



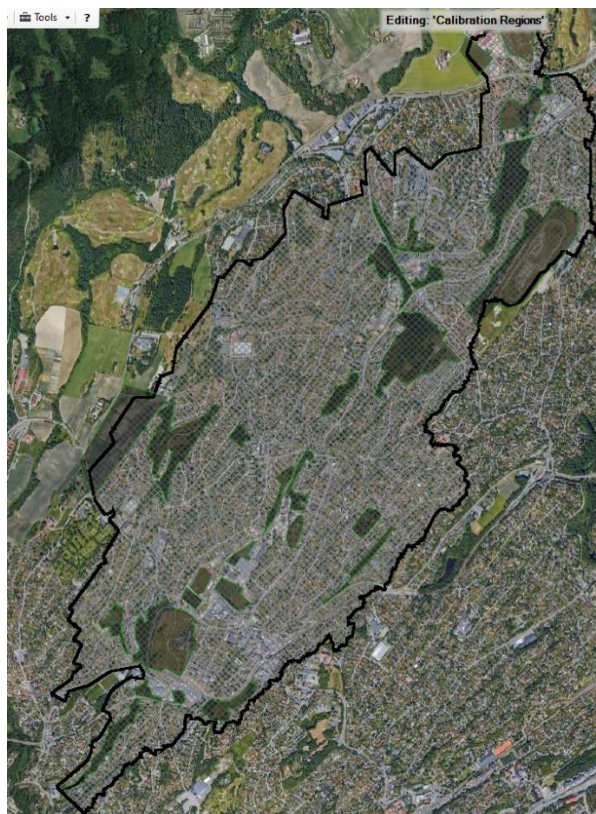
Figur 29: Illustrasjon av ferdig triangelnett med maks areal på 30m² for hovudområde og maks areal på 15m² for detaljområde

Variasjon i botnfriksjon

Botnfriksjonsforhold varierer mykje i dei fleste større felt. For å ta høgde for denne variasjonen er det vanleg å etablere separat lag med verdi for botnfriksjon. I denne oppgåva var ortofoto brukt for å definere område med andre friksjonsforhold.

Mannings i HEC-RAS

I HEC-RAS blei variasjonen i botnfriksjon ivaretatt ved å opprette separat lag, der polygonar beskrev denne variasjonen. Dette kan gjerast på to måtar, enten ved å teikne ut polygon for hand eller ved import av ei shape fil. Når ei shape fil føreligg kan denne importerast til eit land cover lag under Map layer. Denne vil kunne brukast for alle geometrifilar. Er det ynskjeleg å overstyre land cover lag, kan dette gjerast ved å opprette polygon i eit Mannings n lag som vil definere n verdi berre for den gitte geometrien. I denne oppgåva vart begge laga oppretta. Først vart polygona teikna for hand ved å bruke satellittbilete, for så å bli eksportert til ei shape fil og importert inn igjen til eit land cover lag. Polygona vart teikna der satellittbilete viser grøntareal.



Figur 30: Grønområde polygonisert med grøn omriss for separat Mannings lag

Satellittbilde leggjast til ved å høyreklikke på Map layers > Add web Imagery og velger Google Satellit. Ferdigredigert Mannings n lag er illustrert på figur 30. Mannings n verdi brukt for grøntareal/park i oppgåve er 0.05 og elles 0.15 med utgangspunkt i HEC-RAS bruker manual.

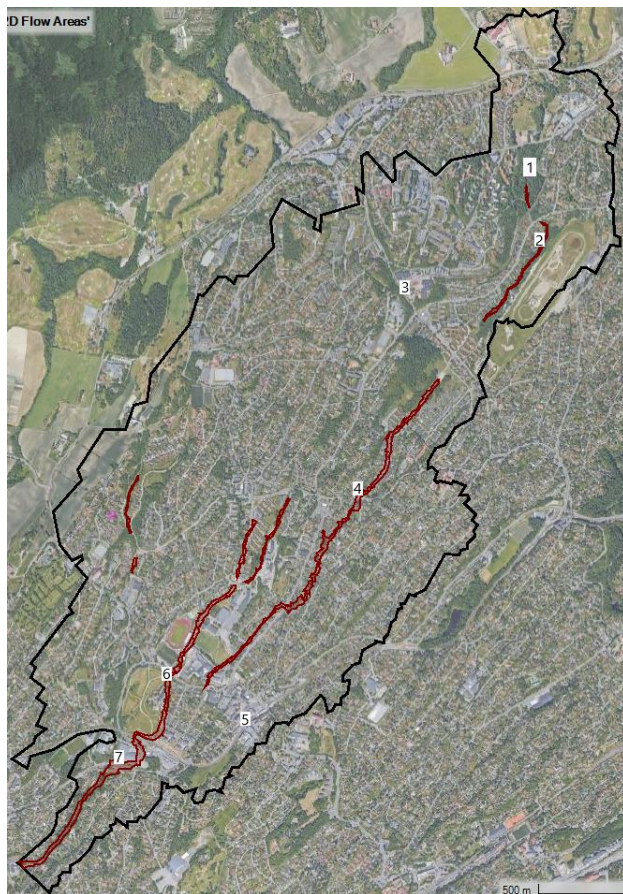
Mannings i MIKE 21

I MIKE 21 er botnfriksjon definert som bed resistance og bruker enten Chezy eller Manning nummer. I denne oppgåve vart Mannings formulering nytta. Mannings nummer kan enten vere konstant for heile feltet, variere i rom og konstant i tid eller variere i både rom og tid. Grunna manglande informasjon om korleis ei romvariert Mannings .dfs fil opprettast, vil denne funksjonen ikkje brukast her. I denne oppgåve blei ein konstant Mannings M på 32 brukt for alle simuleringar i MIKE 21.

Resultatsamanlikning

Eit utval av punkt blei gjort for å ha grunnlag til samanlikning på tvers av verktøy. 7 punkt blei valt i område. Plassering av punkta varierer frå å vere plassert i detaljområde og hovudområdet, øvst i feltet og nedst i feltet og elles i punkt av interesse. Dette gir grunnlag for å observere korleis bruk av detaljområde påverke resultatet. Utvalet blei gjort etter simulering i HEC-RAS på berekningsnett på 20m med detaljområde. For å presentere punkt på same graf, vart punkta først lagt inn i areal.dfsu resultatfil

under data>Time series by coordinates. Tidsserier for vassdjup og hastighet vart vidare eksportert til dfs0 fil. Her vart tidsseriane supplert med data frå HEC-RAS. Bruker manualen til HEC-RAS beskriver danning av tidsseriar i kapittel om Evaluating RAS Results(Engineers). Koordinat til punkt og linje er lista i tabell 3 og oversiktskart er vist på figur 31.



Figur 31: Oversiktskart for samanlikningspunkt

	HEC-RAS	MIKE 21
Punkt 1	590406.10; 6646336.45	590406.10; 6646336.45
Punkt 2	590469.55; 6645906.70	590469.55; 6645906.70
Punkt 3	589692.40; 6645632.62	589692.40; 6645632.62
Punkt 4	589427.44; 6644478.51	589427.44; 6644478.51
Punkt 5	588779.30; 6643154.33	588779.30; 6643154.33
Punkt 6	588331.43; 6643416.34	588331.43; 6643416.34
Punkt 7	588055.50; 6642936.38	588055.50; 6642936.38

Tabell 3: Koordinatliste for punkt og linje som vert samanlikna på tvers av verktøy

7 Resultat

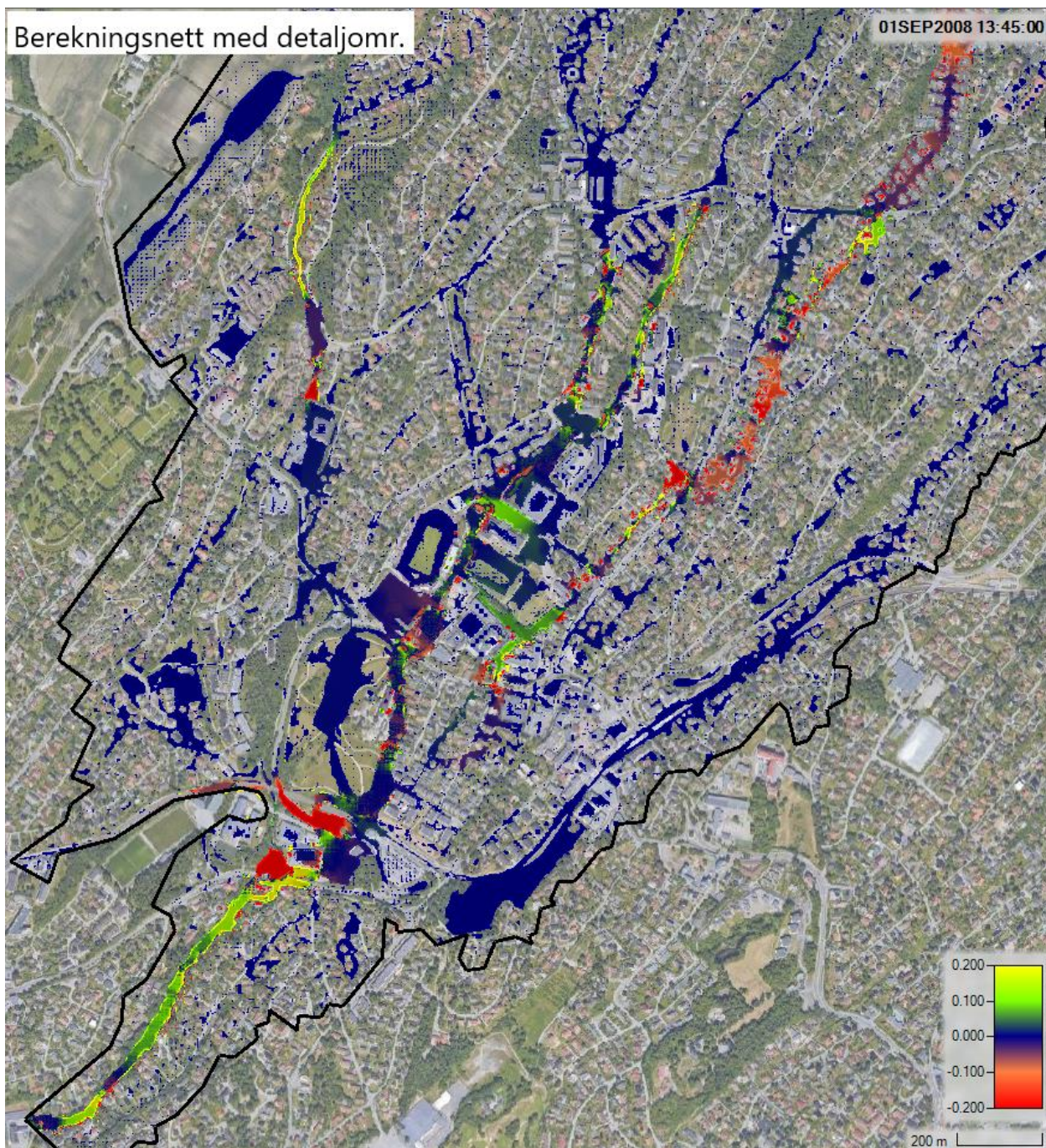
Dette kapittel har som formål å presentere funn gjort under masterperioden. Resultat frå begge verktøy blir presentert med formål å kunne samanliknast i størst mogeleg grad. Der dette ikkje er mogeleg, vil resultatata presenterast separat for kvar verktøy.

Det er gjort eit utval av resultat som presenterast for kvar verktøy. Fordi endringsmønsteret for dei 4 forskjellige berekningsnett kan tenkast å oppføre seg likt ved introduksjon av nye variabel, vil berre resultat frå simuleringar med finast og grovast (for MIKE 21) og berre finast (for HEC-RAS) berekningsnett presenterast grafisk. Resultat kan visast ved forskjellige tidssteg, der tidssteget 13:45 (1t og 45min inn i simuleringar) vart brukt for alle resultat presentert i denne oppgåva. Relevante resultat frå andre berekningsnett og simuleringar er å finne i vedlegg 3.

7.1 HEC-RAS Resultat

I HEC-RAS vart alle resultatlag presentert og redigert i verktøyet HEC-RAS. Alle resultatlag som vert presentert i dette kapittel er samanlikning av to resultatlag. Relevante resultat frå enkeltsimulasjonar og andre samanlikningsresultat blir lagt ved i vedlegg 3.

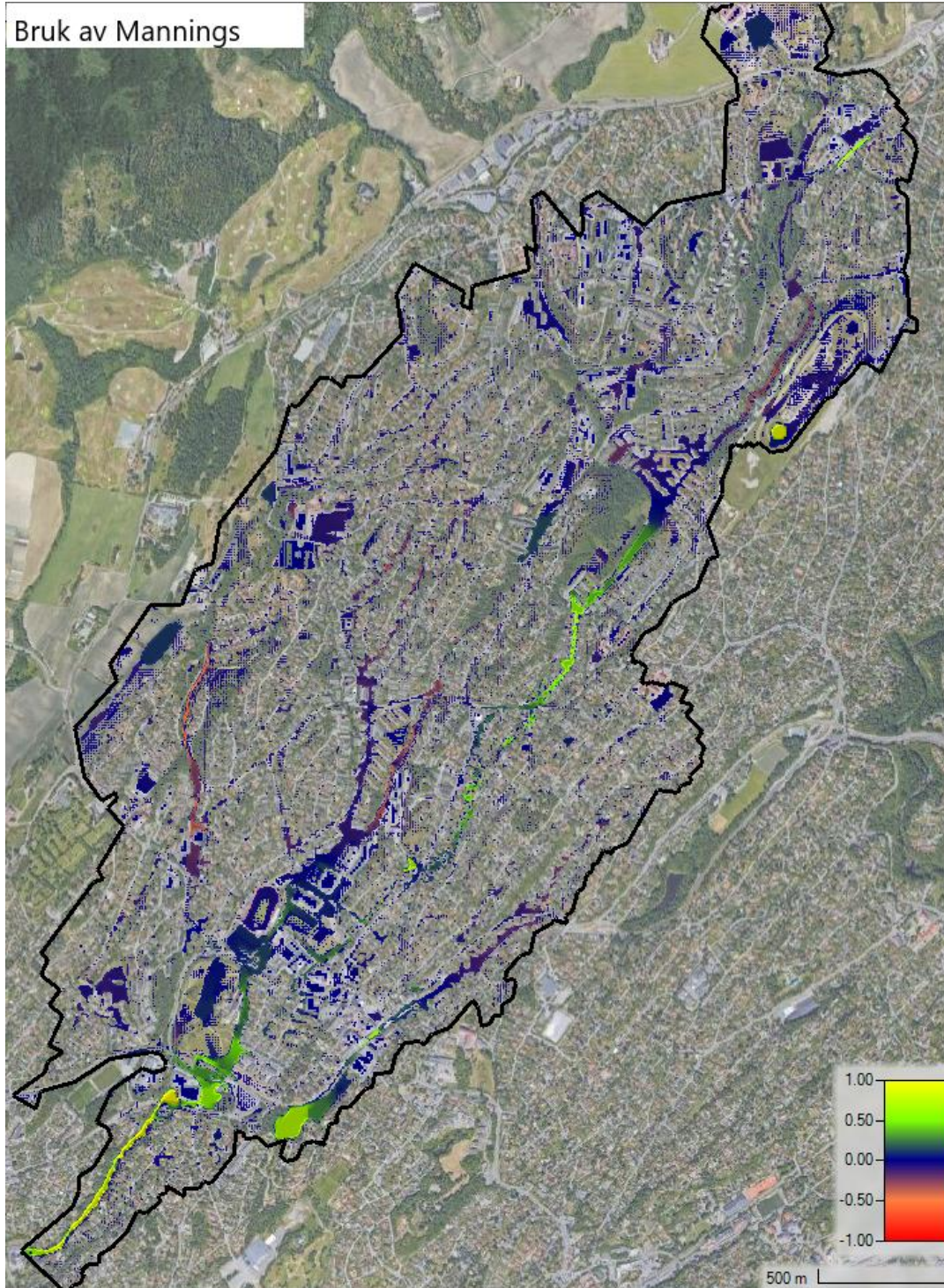
Resultat presentert i dette kapittel tek for seg det finaste berekningsnett med og utan detaljområde. Der den eine berekningsnett er eit uniform nett med 10x10m store celler og det andre berekningsnett har hovudområde dekket med celler på størrelse 10x10m og 2x2m store celler for detaljområdet. Samanlikninga er basert på introduksjon av parameter som påverke vassdjup og hastigheit. Ved introduksjon av detaljområde i homogent berekningsnett, fjerning av variasjon i manningsverdi, bruk av likningssett for heile grunt vatn likningar (som bereknar turbulens og konvektiv akselerasjon) vil samanheng mellom desse parameter og resulterande vassdjup og hastigheit presenterast grafisk. Resultat vil presenterast frå heile felt der dette er hensiktsmessig, der dette førar til uklar presentasjonsbilete vil eit mindre utklipp presenterast.



Figur 32: Samanlikning av vassdjup for eit uniform berekningsnett med 10x10m store celler og eit berekningsnett eit likt berekningsnett med introduserte detaljområder som har 2x2m store celler (berekingsnett 10_2).

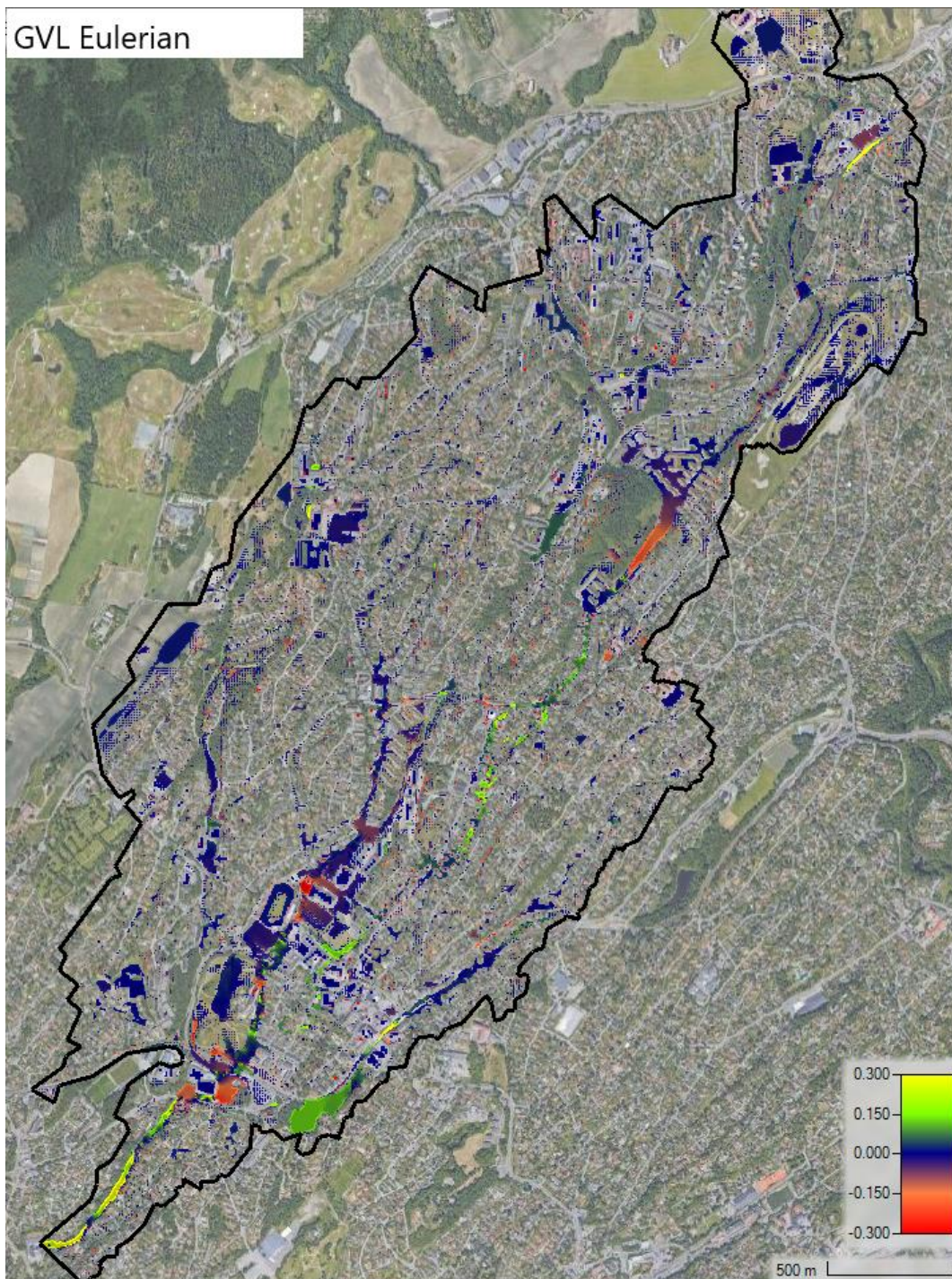
Her er vassdjup for det uniforme berekningsnettet 10x10m subtrahert vassdjupet for berekningsnettet på 10x10m med detaljområde på 2x2m. Summen av denne subtraksjon varierer i hovudsak mellom -0.2 og 0.2. Denne variasjonen illustrert med farger som vist nedst til høgre på figur 32. Steder der raud farge indikerer -0.2m vassdjupdifferanse er berekningsnettet med detaljområde djupare enn berekningsnettet utan detaljområde. Det motsette gjelder for område indikert med gult farge.

Bruk av Mannings



Figur 33: Samanlikning av vassdjup for berekningsnett 10_2 med og utan varierte mannings verdi

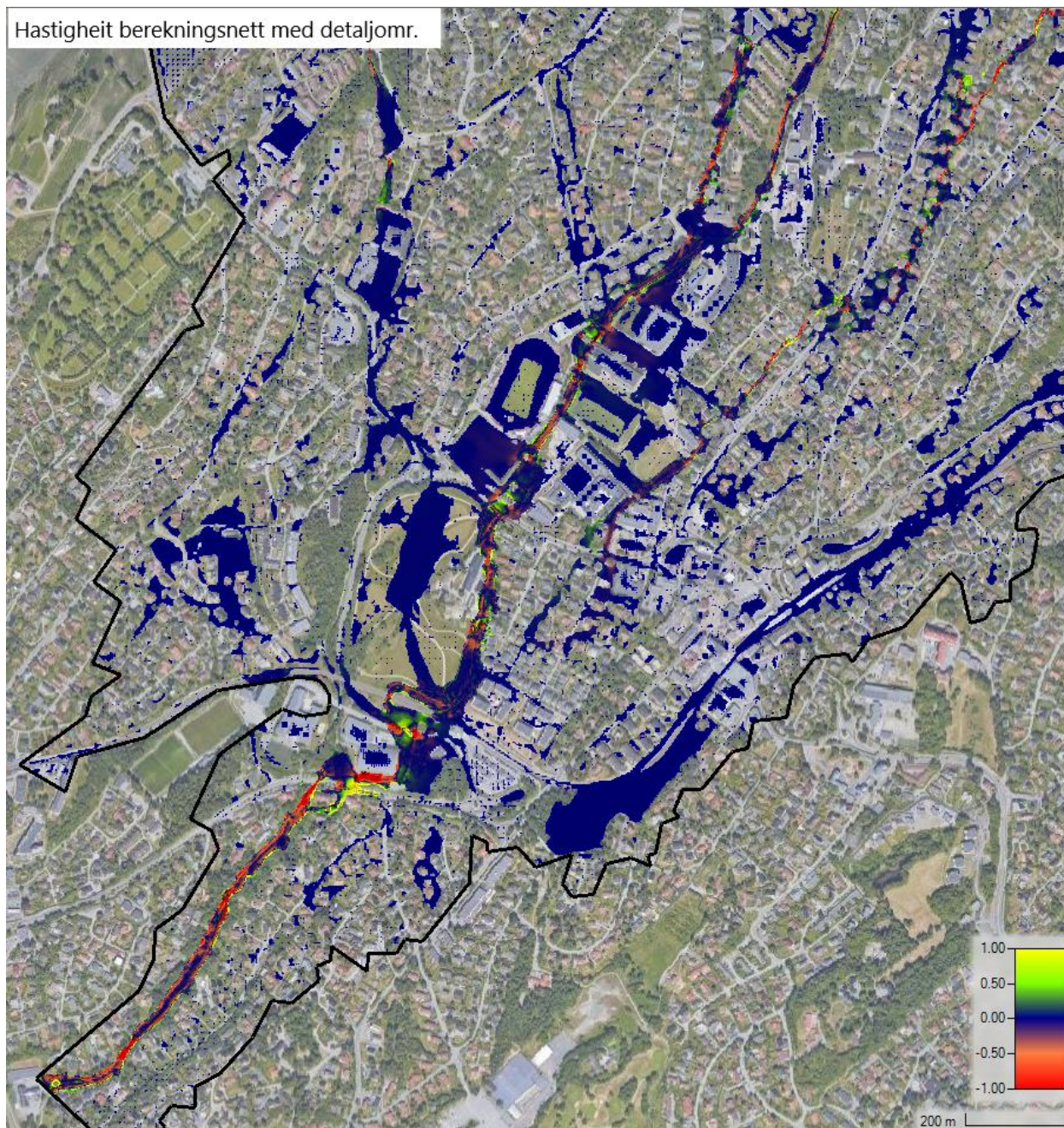
Her blir resulterande vassdjupet for berekningsnett 10_2 med varierte mannings verdi subtrahert vassdjupet frå same berekningsnett utan varierte mannings verdi. Her vil differansen variere mellom 1 og -1m.



Figur 34: Samanlikning av vassdjup for berekningsnett 10_2 berekna med likningssett for diffusiv bølge samanlikna med same berekningsnett løyst med likningssett for heile grunt vatn likningar

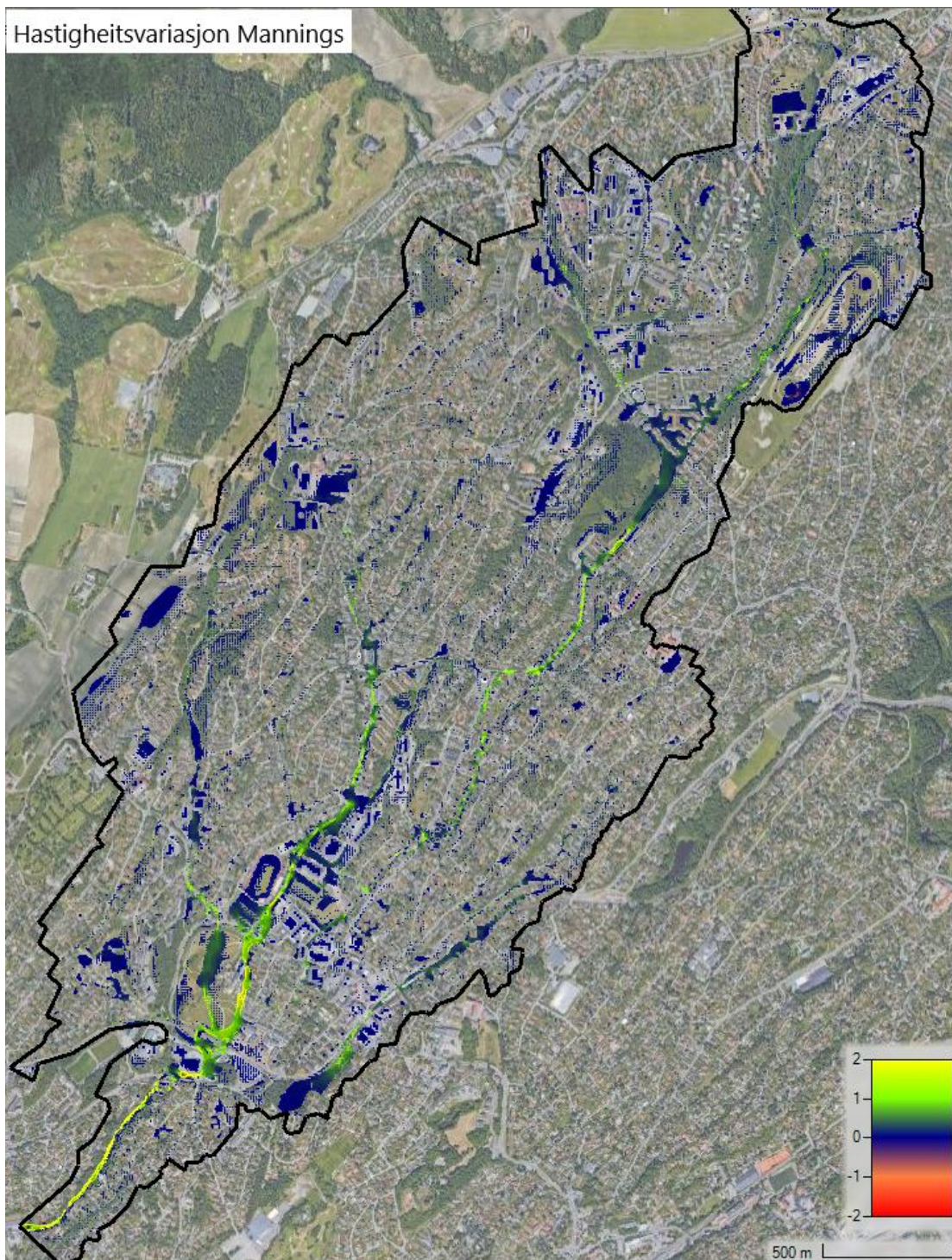
Her blir vassdjupet berekna med diffusiv bølge likning subtrahert vassdjupet berekna med heile grunt vatn likningar. Differansen i vassdjupet spenner frå 0.3 til -0.3m. Positive verdi indikerer område der diffusiv bølge likningar resulterte i større vassdjup enn berekningar utført ved heile grunt vatn likningar.

Hastighet berekningsnett med detaljomr.



Figur 35: Samanlikning av hastighet for eit uniform berekningsnett på 10x10m store celler med eit berekningsnett på 10x10m store celler og eit detaljområde som har 2x2m store celler (berekningsnett 10_2)

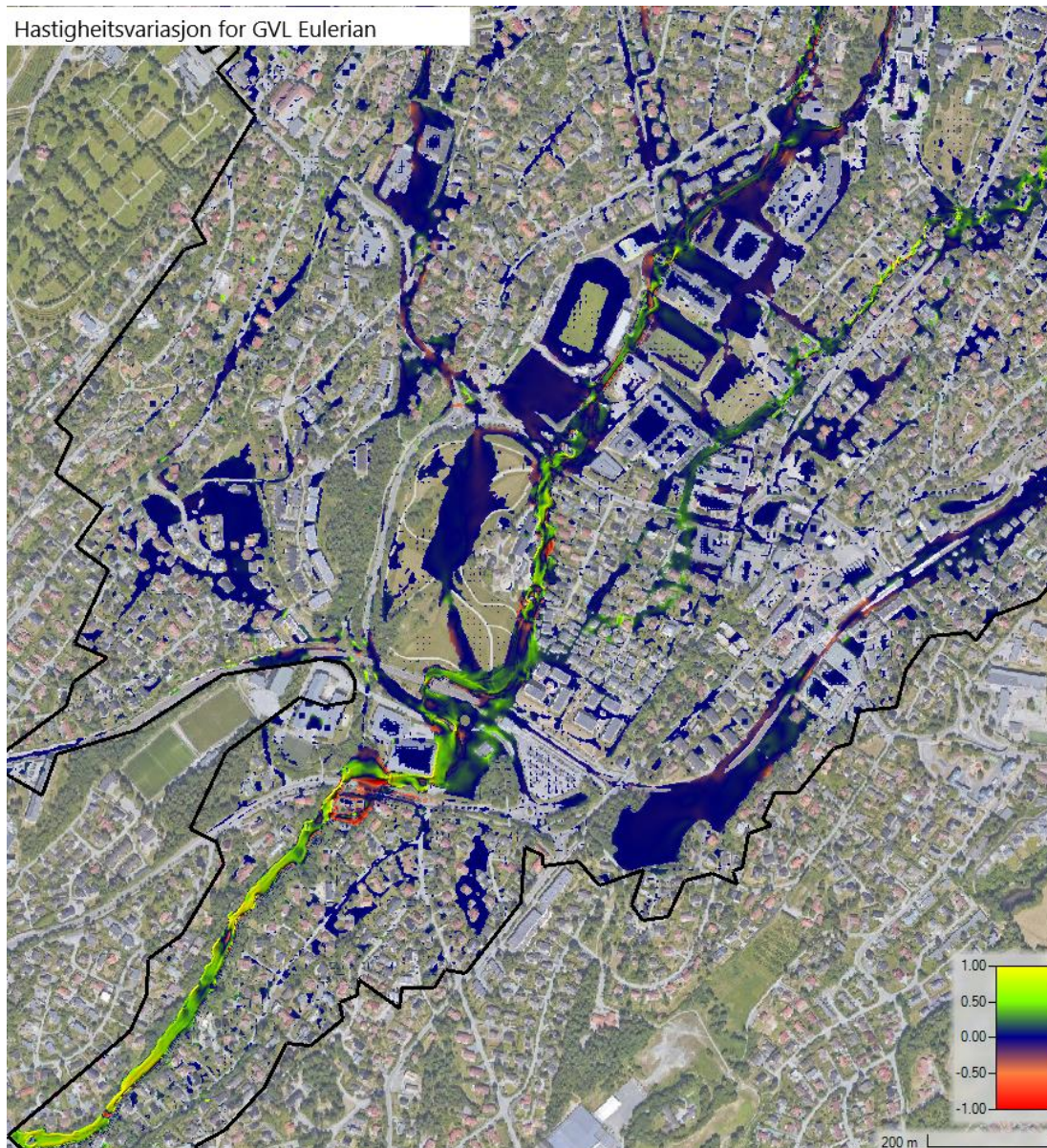
Her vert resultathastigheita frå berekningsnettet med uniforme 10x10m store celler subtrahert hastigheita berekna frå berekningsnettet 10_2. Her er differansen mellom 1 og -1m, der raud farge indikerer område der hastigheita er berekna høgare for berekningsnettet 10_2. Gul farge indikerer det motsatte.



Figur 36: Samanlikning av hastigheiter for berekningsnett 10_2 med og utan varierte mannings verdi

Her vert hastigheita frå berekningsnett 10_2 med varierte mannings verdiar subtrahert hastigheita frå same berekningsnett utan varierte mannings verdiar. Her er det merkbar at differansen i hastigheita er berre positiv over heile feltet. Dette betyr at konstant mannings verdi for heile område resulterer i lågare eller lik hastigheit samanlikna med hastigheita når varierte mannings verdi nyttast.

Hastigheitsvariasjon for GVL Eulerian



Figur 37: Samanlikning av hastigheit for berekningsnett 10_2 berekna med likningssett for diffusiv bølge og heile grunt vatn likningar (Eulers metode).

Figur 37 viser differansen i hastigheit når diffusiv bølge eller heile grunt vatn likningar blir brukt. Her blir hastigheita til diffusiv bølge simulasjon subtrahert hastigheita frå heile grunt vatn likning.

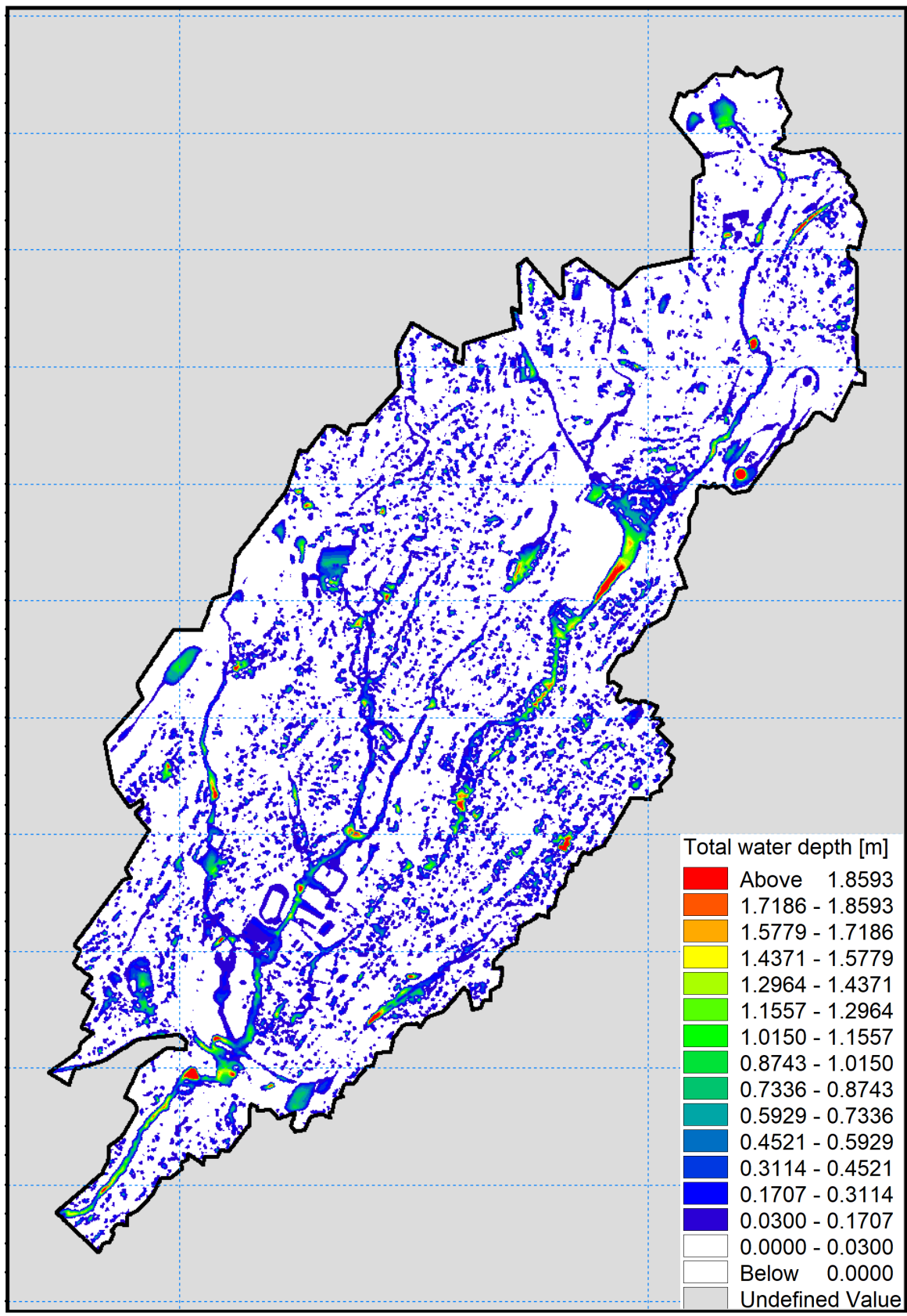


Figur 38: Samanlikning av flaumutbreiing mellom berekningsnett på 10x10m diffusiv bølge (blå gjennomskinleg farge) og berekningsnett 10_2 heile grunt vatn likningar (raud farge).

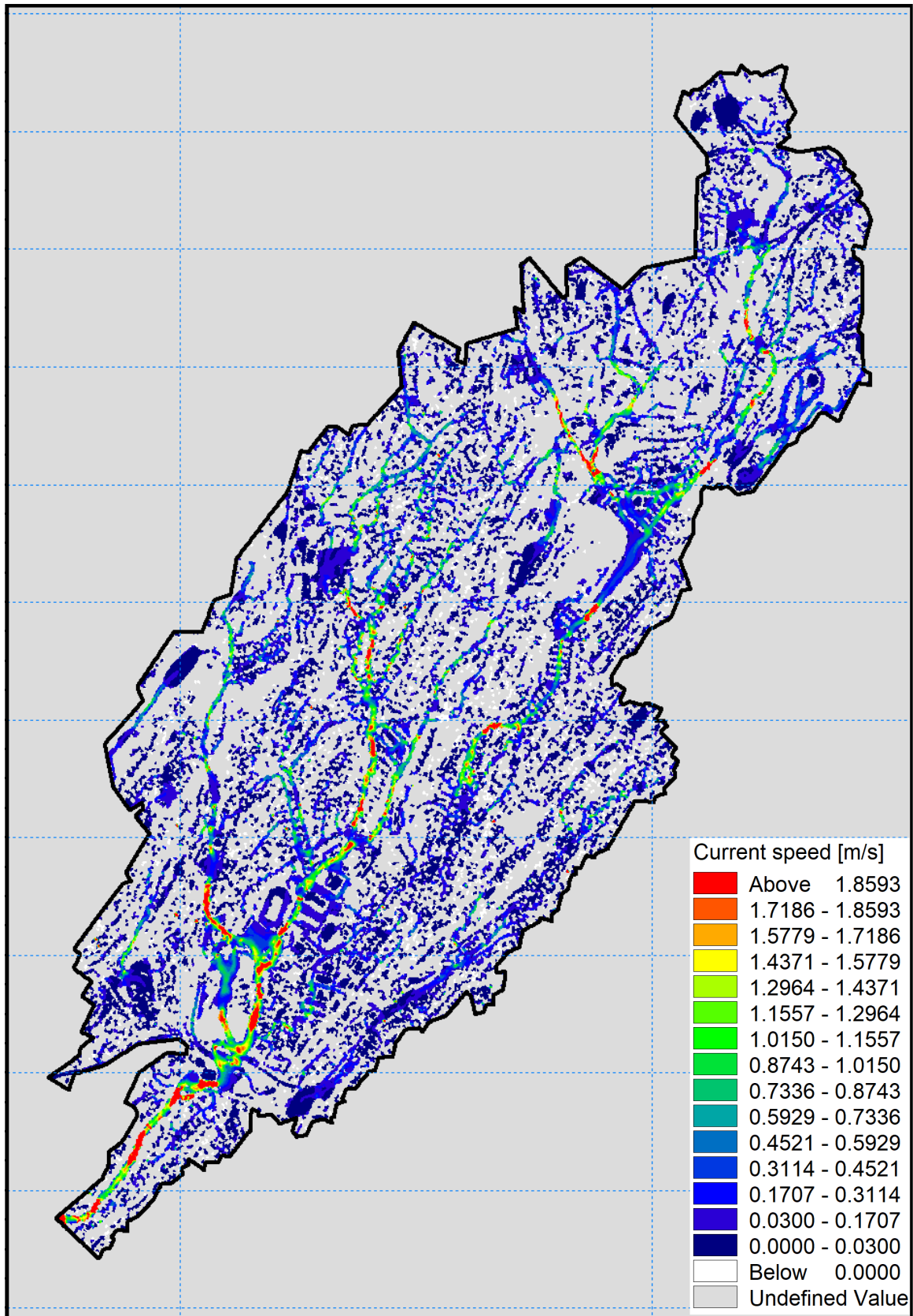
Figur 38 viser ein samanlikning av flaumutbreiing på minst 10 cm vassdjup. Det er stort sett lik flaumutbreiing, som gjorde det lite oversikteleg å ha med heile område. Derfor viser figuren eit utsnitt frå feltet der eksempel i variasjon for flaumutbreiing er markert med raud boks der diffusiv bølge har større utbreiing og gul boks der heile grunt vatn likningar har større utbreiing.

7.2 MIKE 21 Resultat

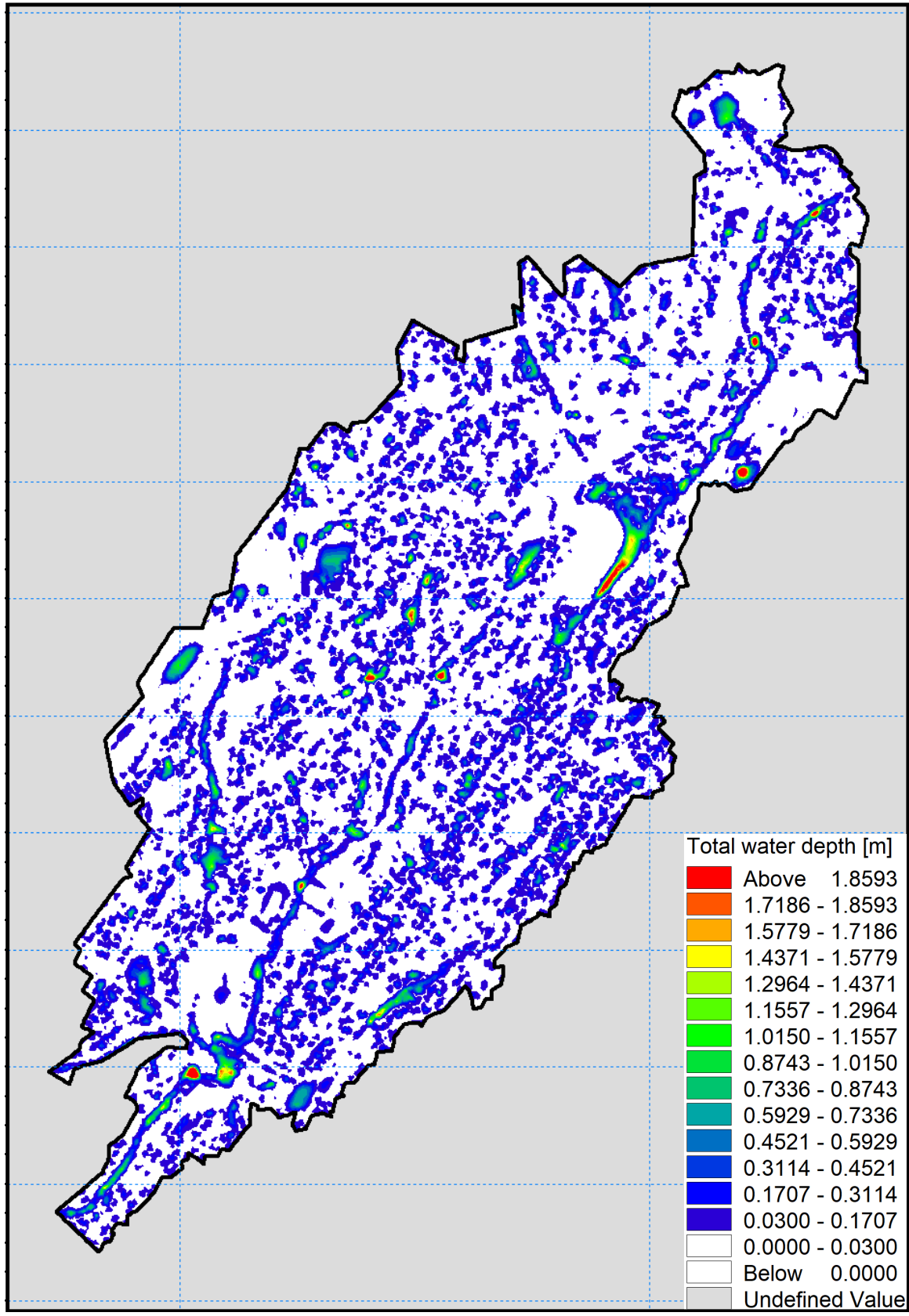
I MIKE 21 vart alle resultatlagar presentert og redigert i verktøyet MIKE 21. Da det ikkje føreligg innebygd resultatredigering i MIKE 21, vil resultat presenterast og samanliknast grafisk. Videre kan resultat visast ved forskjellige tidssteg, der i denne oppgåva vart tidssteg 13:45 (1t og 45min inn i simuleringar) nytta.



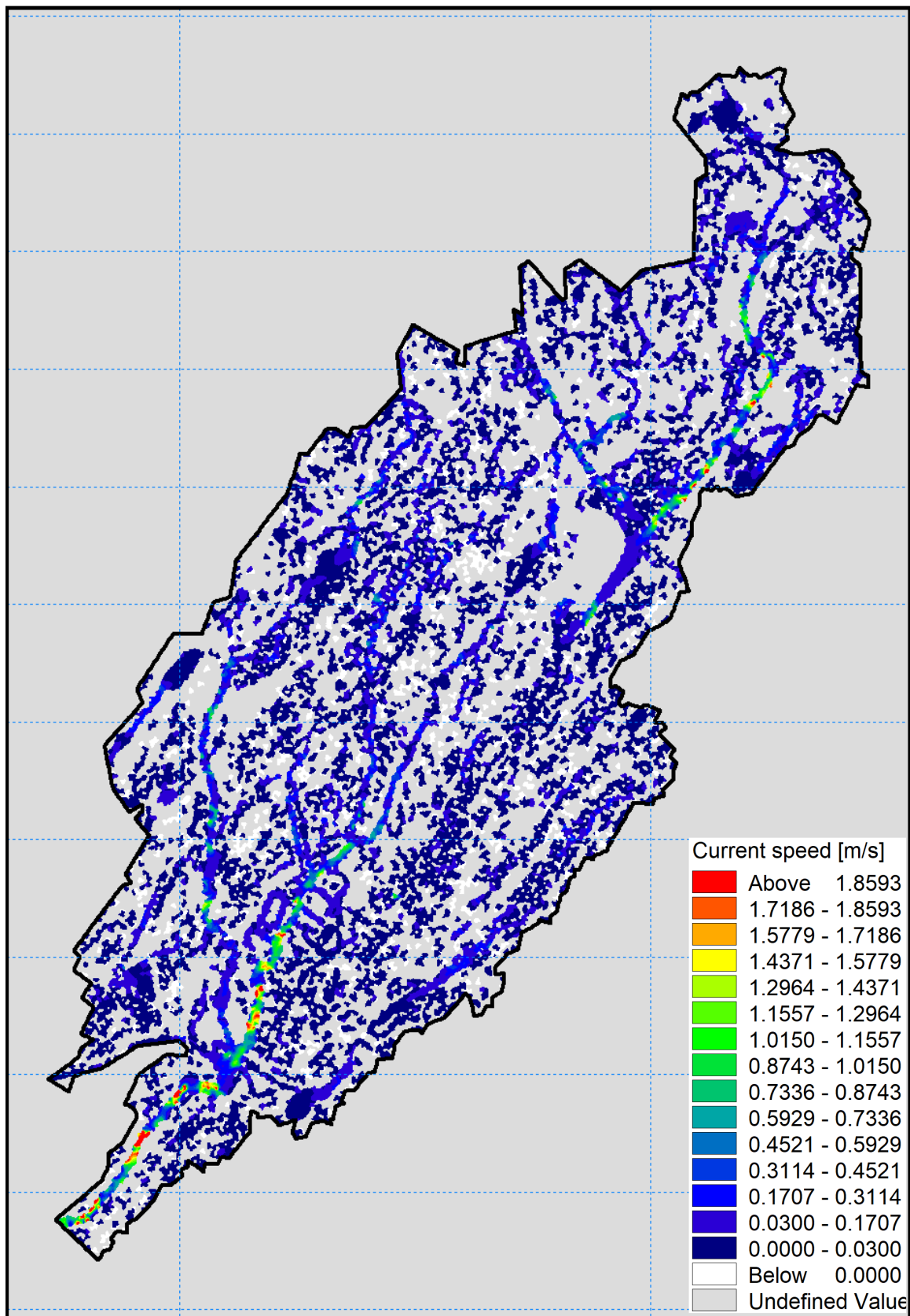
Figur 39: Vassdjup for berekningsnett med maks triangelareal på 30m² berekna med høg ordens algoritme.



Figur 40: Hastighet for berekningsnett med maks triangelareal på 30m² berekna med høg ordens skjema.



Figur 41: Vassdjup for berekningsnett med maks triangelareal på 100m².



Figur 42: Hastighet for berekningsnett med maks triangelareal på 100m².

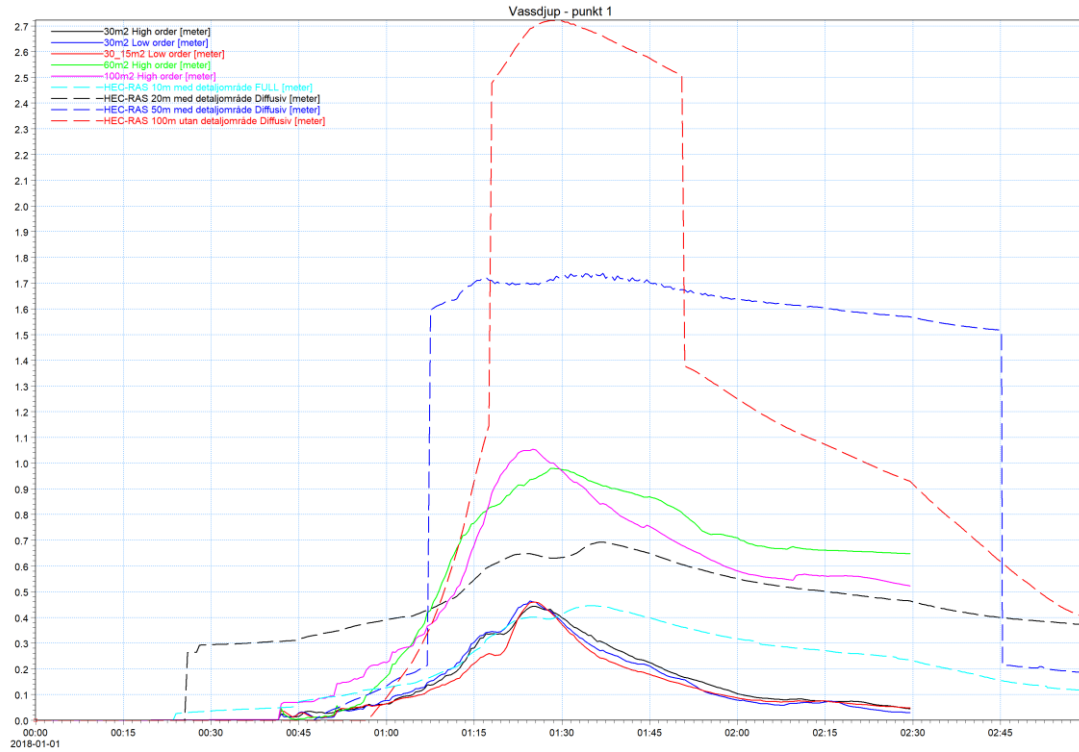
7.3 Samanlikningspunkt

I dette kapittel vil punkt lista på tabell 3 samanliknast på tvers av verktøy. Resultat presenterast punktvis, der vassdjup vert presentert først etterfølgt av hastigheit. Dei forskjellige linjene på figurane viser resultat av eit spesifikt simulering i MIKE 21 og HEC-RAS. For å gjere figurane lettare å lese vart eit utval av simuleringar presentert. Det er henta ut 5 resultatsimuleringar frå MIKE 21 og 4 frå HEC-RAS. Desse er lista på figurane med tilhøyrande farge. Frå MIKE 21 vart disse simuleringar valt:

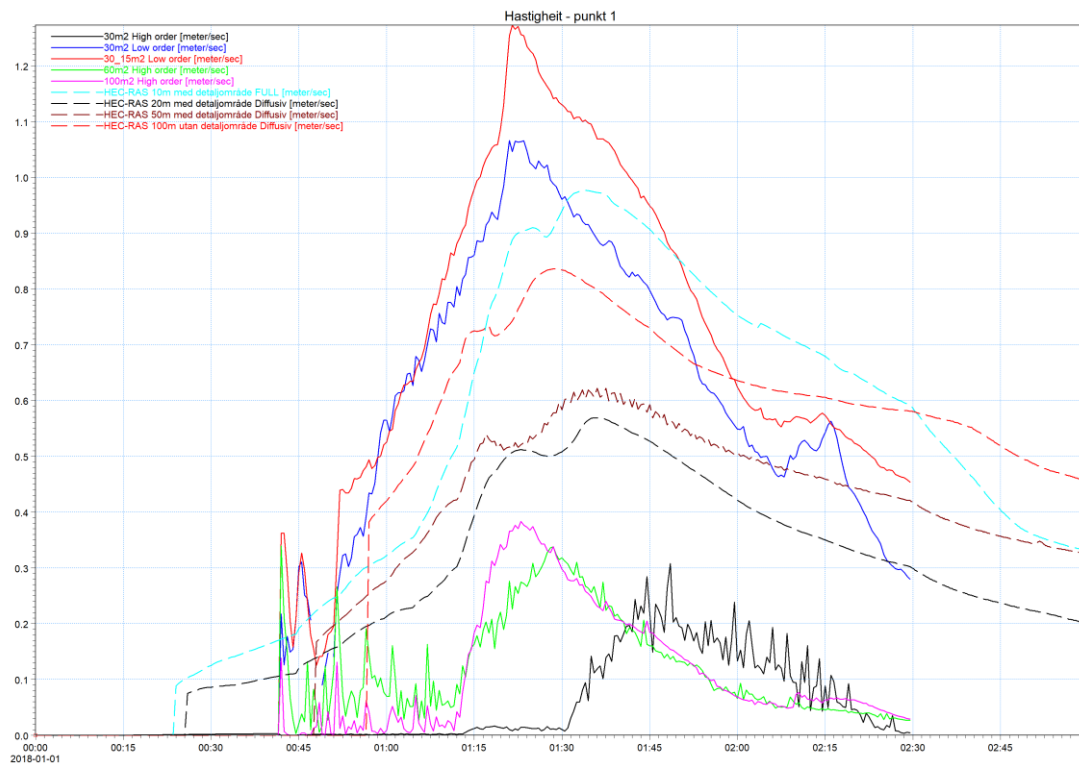
1. Berekningsnett med maks triangelstørrelse på 30m^2 og høg ordens algoritme.
2. Berekningsnett med maks triangelstørrelse på 30m^2 og låg ordens algoritme.
3. Berekningsnett med maks triangelstørrelse på 30m^2 for hovudområdet og 15m^2 for detaljområdet og låg ordens algoritme.
4. Berekningsnett med maks triangelstørrelse på 60m^2 og høg ordens algoritme.
5. Berekningsnett med maks triangelstørrelse på 100m^2 og høg ordens algoritme.

Videre vart disse simuleringar valt frå HEC-RAS:

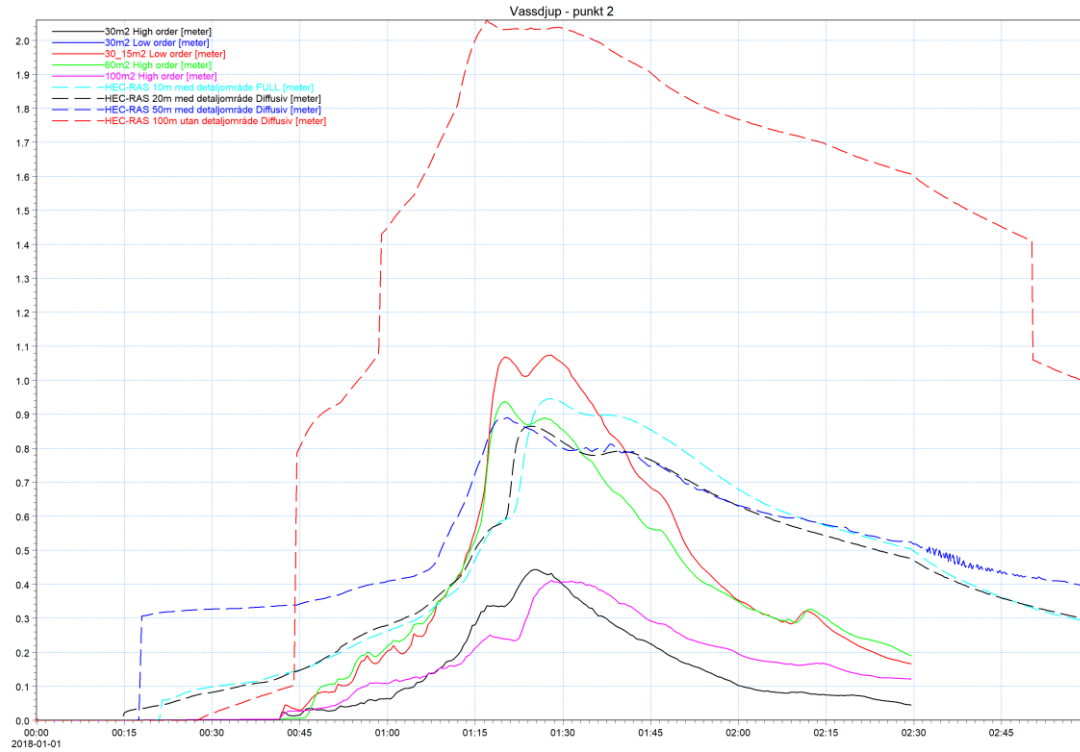
1. Berekningsnett der cellestørrelse er på $10\times 10\text{m}$ for hovudområdet og detaljområdet med celler på $2\times 2\text{m}$. Likningssett brukt for berekningar er full grunt vatn likningar.
2. Berekningsnett der cellestørrelse er på $20\times 20\text{m}$ for hovudområdet og detaljområdet med celler på $5\times 5\text{m}$. Likningssett brukt for berekningar er diffusiv bølge likningar.
3. Berekningsnett der cellestørrelse er på $50\times 50\text{m}$ for hovudområdet og detaljområdet med celler på $10\times 10\text{m}$. Likningssett brukt for berekningar er diffusiv bølge likningar.
4. Berekningsnett der cellestørrelse er på $100\times 100\text{m}$ for hovudområdet utan detaljområdet. Likningssett brukt for berekningar er diffusiv bølge likningar.



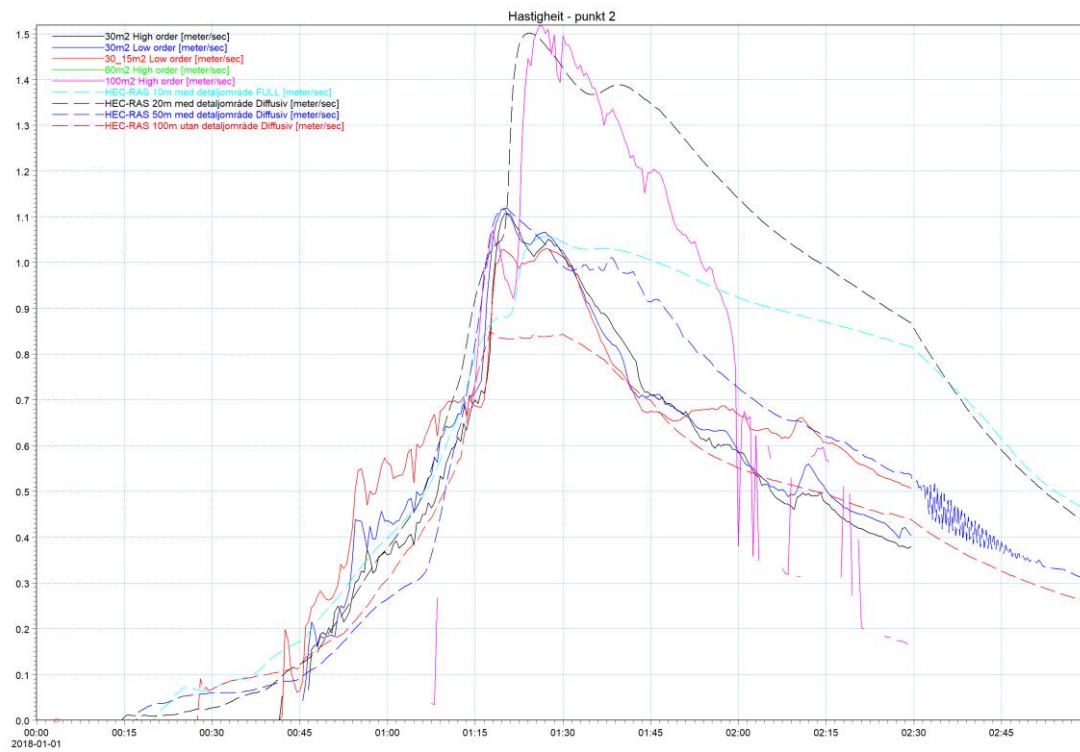
Figur 43: Samanlikning av vassdjup i punkt 1



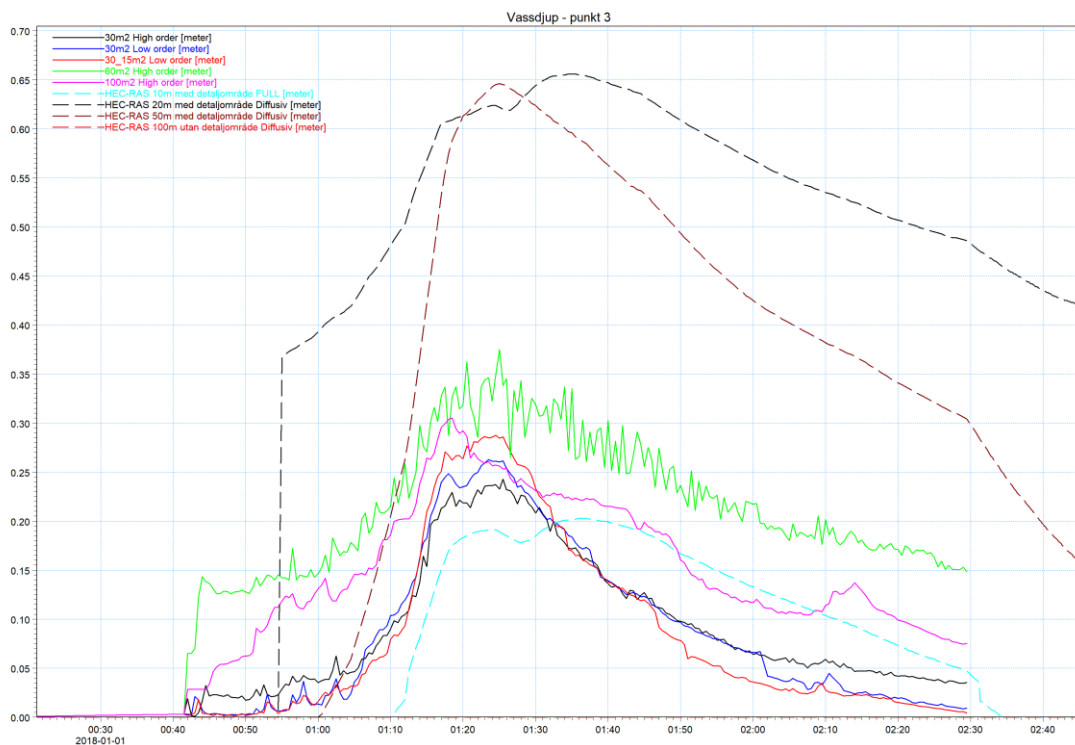
Figur 44: Samanlikning av hastighet i punkt 1



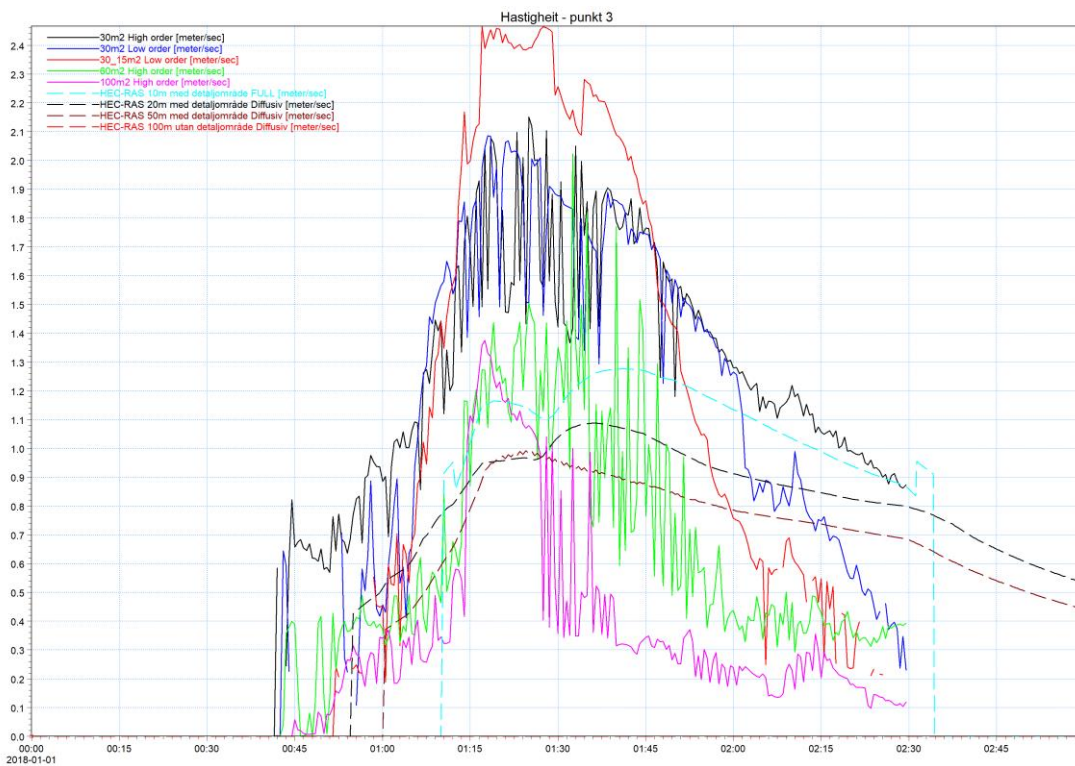
Figur 45 Samanlikning av vassdjup i punkt 2



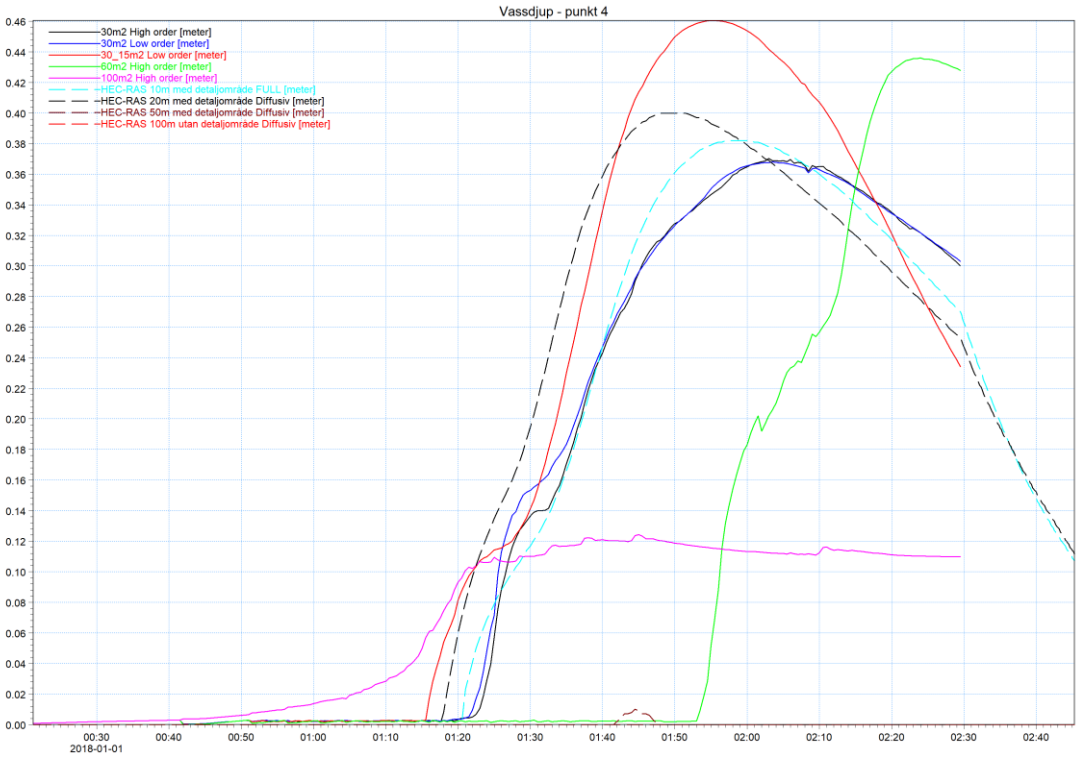
Figur 46: Samanlikning av hastighet i punkt 2



Figur 47: Samanlikning av vassdjup i punkt 3



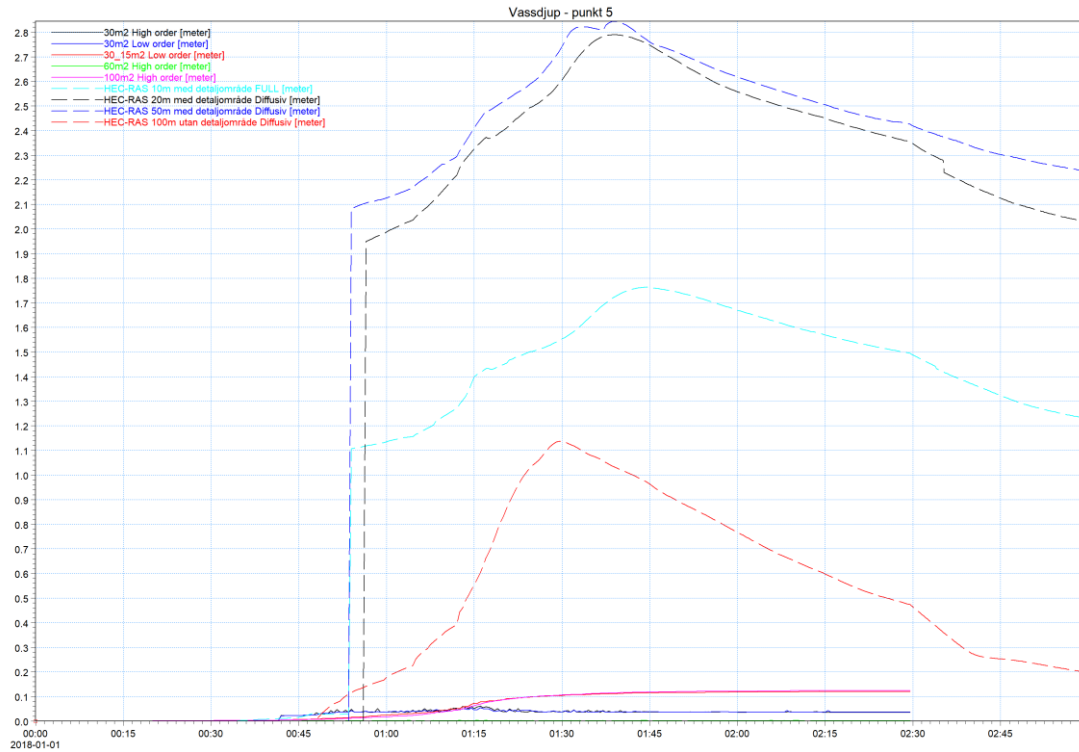
Figur 48: Samanlikning av hastighet i punkt 3



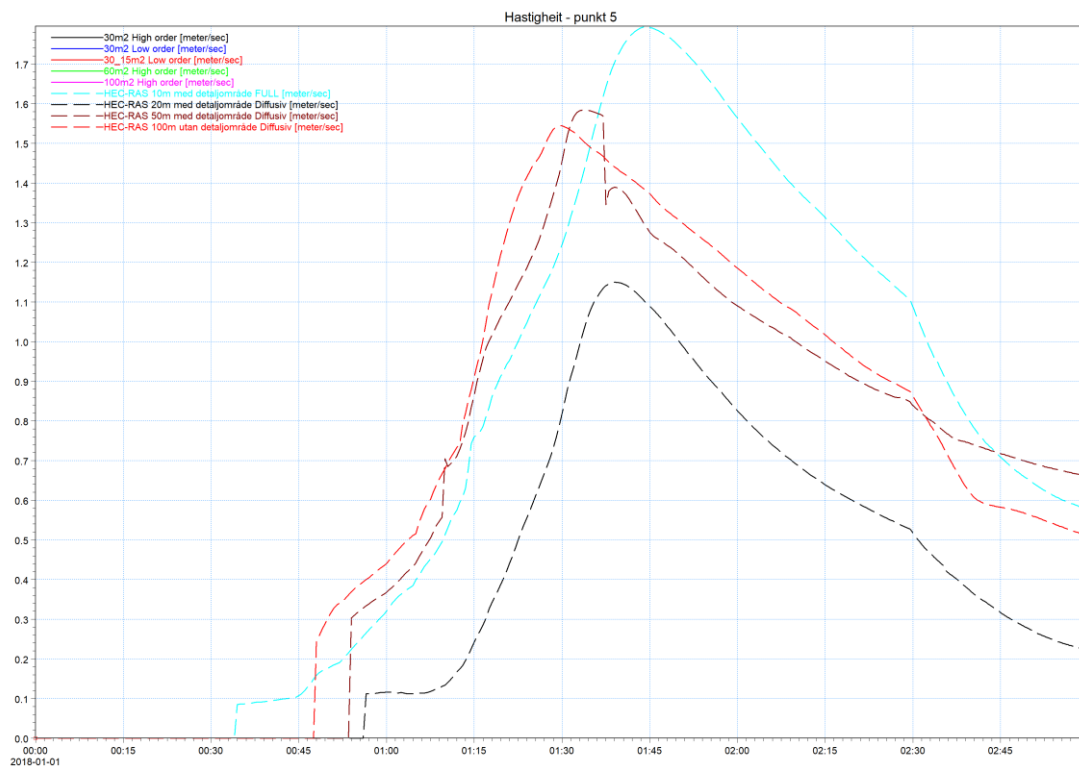
Figur 49: Samanlikning av vassdjup i punkt 4



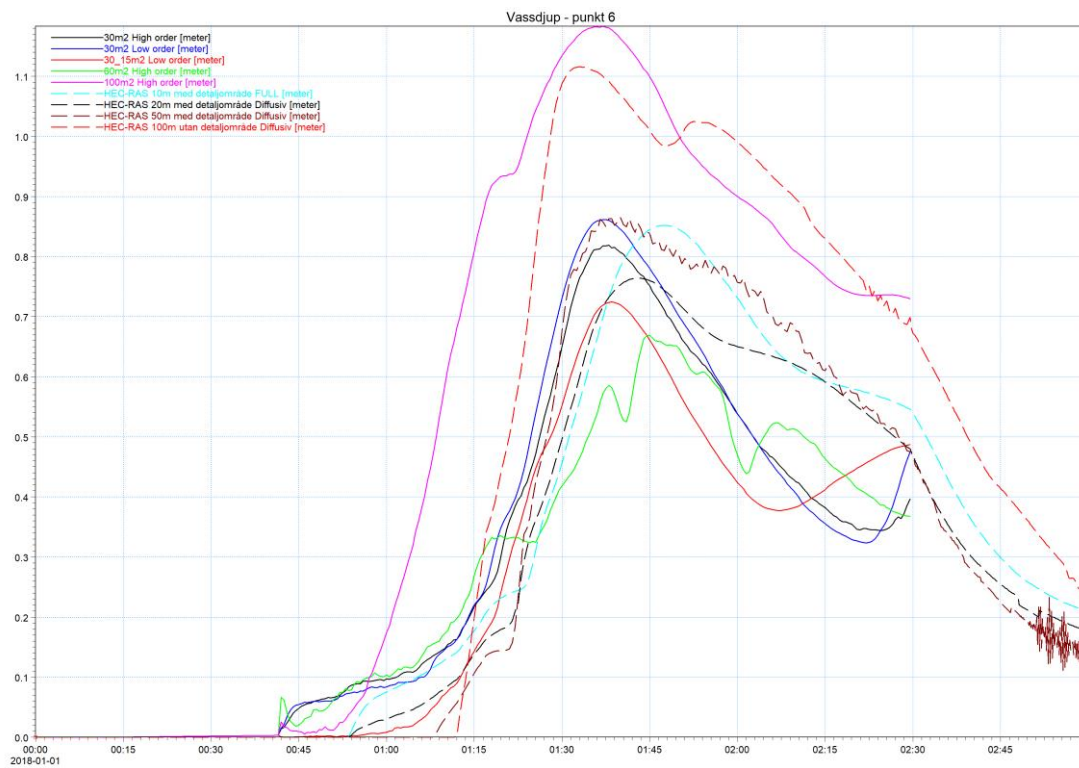
Figur 50: Samanlikning av hastighet i punkt 4



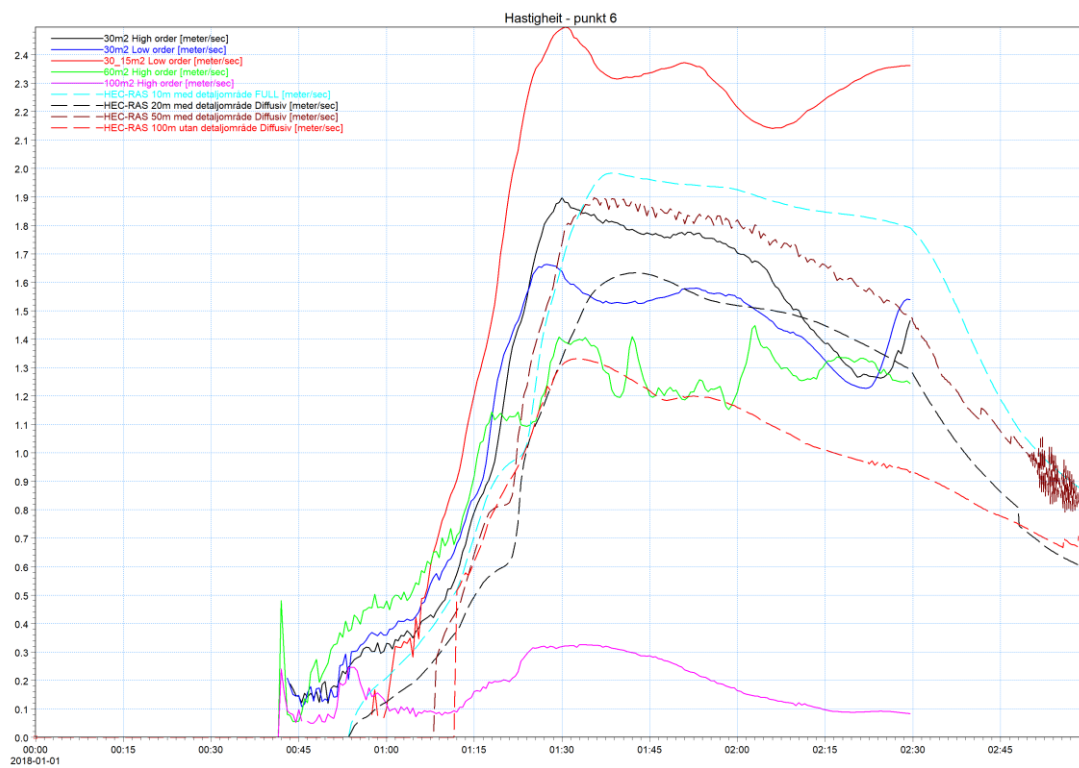
Figur 51: Samanlikning av vassdjup i punkt 5



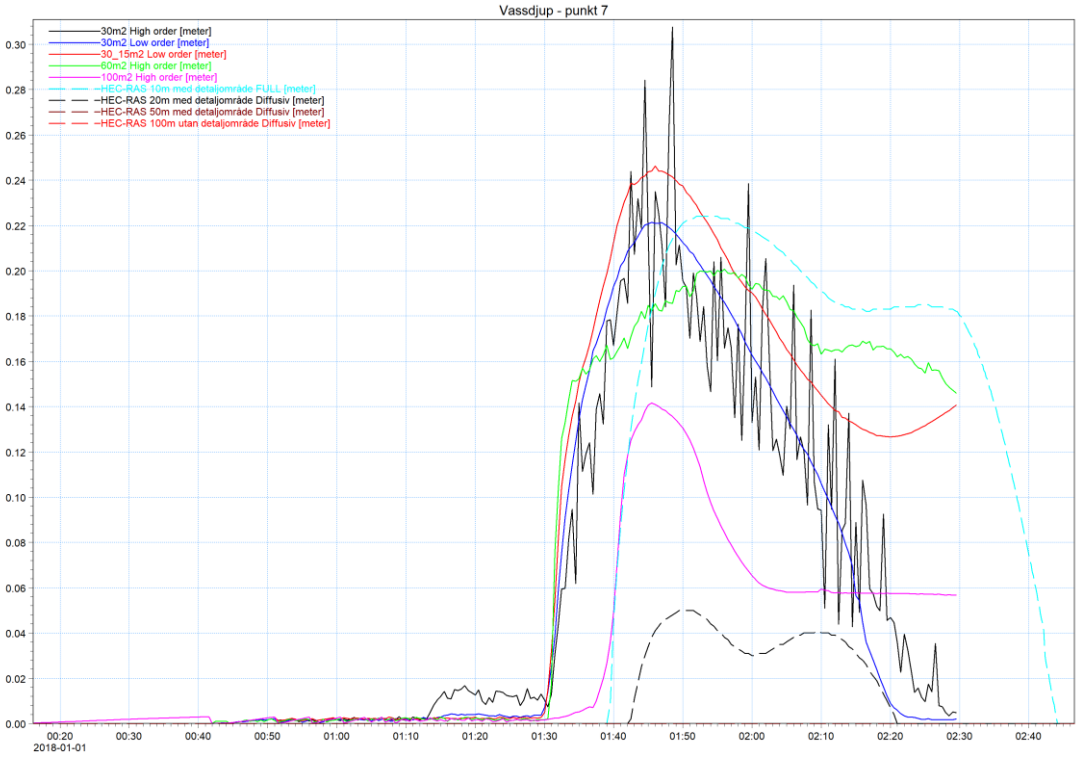
Figur 52: Samanlikning av hastighet i punkt 5



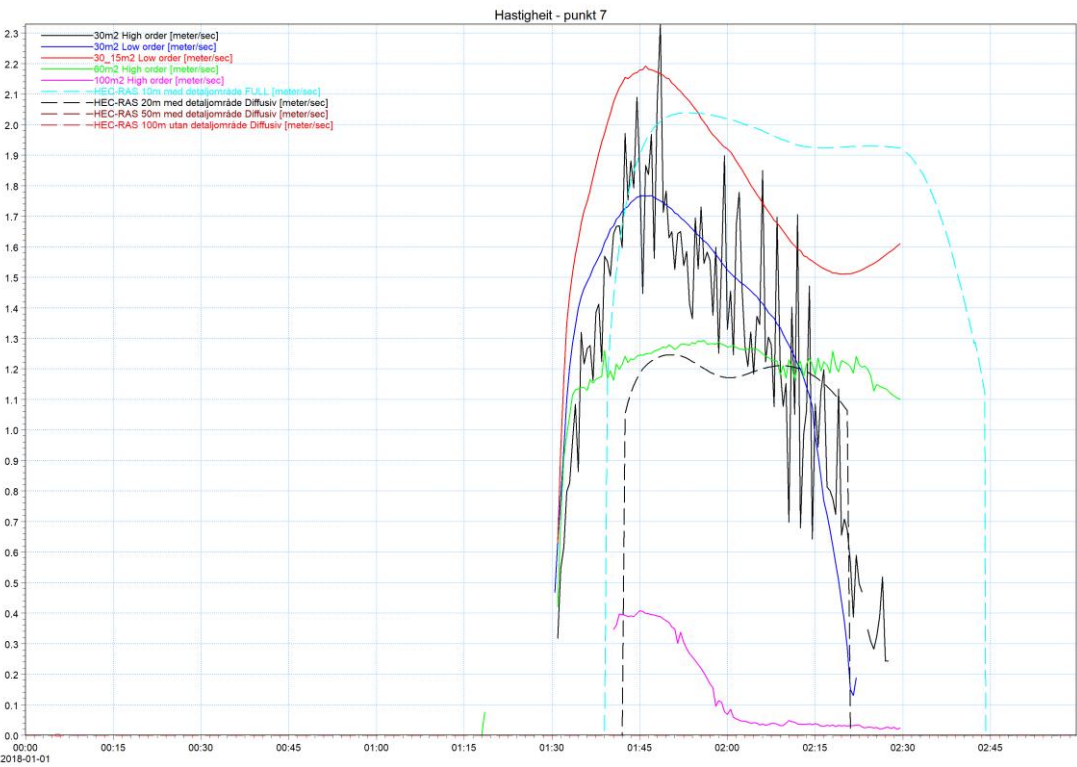
Figur 53: Samanlikning av vassdjup i punkt 6



Figur 54: Samanlikning av hastighet i punkt 6



Figur 55: Samanlikning av vassdjup i punkt 7



Figur 56: Samanlikning av hastighet i punkt 7

8 Diskusjon

Diskusjonskapittel skal delast inn i tre delar. Den første delen vil omhandle diskusjon av framgangsmåten brukt for å lage resultat. I den andre delen vil sjølve resultat diskuterast og siste vil ein generell brukarvenlegheit diskuterast.

8.1 Danning av modell

I dette delkapittel vil aspekt som danning og redigering av terrengmodell, introduksjon av friksjonslag, val av simuleringsparameter og danning av resultatlag bli diskutert.

Framstilling av terreng og berekningsnett i begge verktøy er kanskje den største forskjellen og pregar resultat i stor grad. Viktigheita av gode detaljområde eller brotlinjer i HEC-RAS kan ikkje påpeikast nok. For at berekningsnettet skal fange opp terrengvariasjonar på ein god måte må celledene i berekningsnettet plasserast med omhug. Dette har HEC-RAS handtert på ein god måte ved å gi brukaren stor friheit i å definere overgangen til finere eller grovare berekningsnett. Desse detaljområde/brotlinjer dannast enkelt ved å bruke resultat frå innleiande simuleringar eller ved å importere dei frå andre verktøy. Når celledene ikkje plasserast ved strøymingshinder/definierende objekt, kan feil strøymingsbilete dannast. Det er ikkje alltid lett å vite kor strøymingshinder finner sted, som kan gjere det vanskeleg å definere disse. Hinder er ofte lettare å definere etter ein innleiande simulering, der lekkasje frå ei celle til ein anna er meir tydeleg. Fordel med å ha separat berekningsnett er at terrengmodellen kan ha veldig fin oppløysing utan å skape problem for berekning. Dette vil igjen gi meir presise resultat for lagringskapasitet til feltet.

I MIKE 21 er plassering av celledene av mindre viktigheit. Dette fordi berekningsnettet består av triangulære flater. Dette triangelnettet brukast både til bestemming av lagringskapasitet til feltet og til utveksling av vassvolum mellom trianglar. Dette gjere bruken av brotlinjer eller detaljområde mindre hensiktsmessig. Som namnet MIKE 21 Flow Model FM (Flexible mesh) tilseier har triangelnettet mogelegheit å vere fleksibel. I MIKE 21 blir denne fleksibiliteten hovudsakeleg brukt med omsyn til høgde på triangelnettet. Dette gir verktøyet mogelegheit å ha finere eller grovare triangelnett for områder høgare eller lågare på triangelnettet. Denne fleksibiliteten var ikkje relevant for denne oppgåva, fordi feltet nedstraums eller oppstraums ikkje har noko behov for mindre eller større trianglar berre på grunn av sin høgde. Om denne overgangen til finere triangelnett kunne gjerast på grunnlag av lokale høgde, der naturlege vassvegar/forseinkingar kunne ha finare triangelnett ville dette vore meir relevant for denne oppgåva. Detaljområde eksportert frå HEC-RAS vart også brukt i MIKE 21. Dette viste seg til å ikkje ha ynskja resultat, fordi ein bratt overgang frå store triangel til små triangel utan overgangssone førte til numerisk ustabilitet fleire steder. Dette måtte redigerast manuelt, der trianglar i

problemområdet måtte jamnast ut. Tidsmessig brukte begge verktøy rundt like lang tid på å danne terreng/berekningsnett.

Eit annet viktig aspekt ved danning av terreng/berekningsnett er mogelegheita å redigere terrenget. Dette er betydeleg betre tilrettelagt i HEC-RAS, der justeringslinjer kan importerast eller dannast manuelt. Dette er ikkje tilfellet i MIKE 21, der kandidaten sleit med å justere terrenget. Etter å ha importert linjer for justering, vart desse brukt for å generere triangelnettet. Dette gav riktig plassering av noder. Interpolering av linjer var likevel ikkje noko kandidaten fant ein god løysing på. Dette fordi triangelnettet bruker scatter data (høgdedata) som grunnlag for interpolering av noder. Scatter data lesast som punkt, noko som gjorde at kandidaten måtte manuelt klikke ut høgdene for justering av terreng. Redigering av høgdedata er også ei mogelegheit, men fordi punkttettheita var stor, ville dette vore veldig tidsskrevande. Ferdig justert terreng var likevel ikkje ein god representasjon av realiteten. Dette er vist på figur 63 i vedlegg 2. Løysinga for terrengjustering ville mogeleg vore å parallelforskyve to linjer, ein på kvar side av justeringslinja. Desse linja ville gitt større bredde for kanalen som igjen ville gi meir plass til vassføring. Resultata frå simuleringar i MIKE 21 viser (figur 49, 63 og 64) at vassmassen ikkje kunne fraktast via denne justeringa (punkt 5 i tabell 3). Dette var ikkje problematisk for HEC-RAS der justeringa kunne implementerast utan problem og hadde gode resultat som vist på figur 51 og 52.

Lag eller filar som beskriver variasjon i friksjon mot bakken var noko kandidaten ikkje fekk til i MIKE 21. Dette fordi kandidaten ikkje fant brukarmanualar som beskriver danning av desse filane på heimesidene til DHI. I HEC-RAS var dette ikkje eit problem. Metoden brukt for å bestemme område for andre manning's n verdi har sine svakheita, men dette vurderast som mindre viktig. Figur 41 viser at hastigheita i feltet auke ved introduksjon av lågare manning's n verdi for grøntområde. Denne auke i hastigheita nedstraums i feltet førte til at vassdjup lenger oppstraums i feltet minkar og aukar nedstraums i feltet som vist på figur 35.

HEC-RAS gir stor friheit i val av simuleringsinnstillingar. Innstillingar som vart variert i denne oppgåva var likningssett (Diffusiv bølge, Eulers eller Eulers – Lagranges) som kunne kombinerast med innstillingar for turbulensmodellering. Videre vart tidssteget også endra frå konstant til Courants bestemt tidssteg. Det vart brukt to metodar for definisjon av terskelverdi for Courants nummer. Mogelegheita til å bestemme terskelverdi for når tidssteget skal doblast eller halverast gir stor friheit. I MIKE 21 kan enten Low order, fast algorith eller high order veljast for val av korleis likningssettet skal løysast. Videre er val tidssteg avgrensa til kritisk Courant nummer terskel og maksimum, minimum tidssteg. I HEC-RAS er det mogeleg å definere om det skal brukast iterativ eller direkte matrise løyser. Her opplevde kandidaten ikkje noko merkbar forskjell for simuleringar utført i denne oppgåva. Mogelegheita til å definere parameter med større friheit har kapasitet til å introdusere feil i modellen, spesielt når brukaren av verktøyet har lite kjennskap til disse parameter. På sikt kan dette gi meir kontroll og styringsevne til å skreddarsy modellen til gitte behov, men innleiingsvis kan dette vere unødvendig og kjelde til feil.

Danning av resultatlag og presentasjon av desse var betydeleg forskjellig i begge verktøy. HEC-RAS har programdefinerte resultatlag for andre parameter i modellen som kan lett visast i etterkant av simulering. Dette er ikkje tilfellet i MIKE 21, der output eller ynskja resultat må predefinierast. Dette betyr at brukaren må vere klar over kva resultat skal presenterast før simulering køyrast. HEC-RAS har vidare mogelegheit å anvende scripts for å kalkulere eit resultatlag gitt andre resultatlag. Dette gir større

friheit i definisjon av resultat og vart i denne oppgåva brukt for å samanlikne resultat for vassdjup og hastigheit. MIKE 21 har ikkje funksjonalitet for dette. Skal denne type analyse utførast for resultat frå MIKE 21, må dette gjerast i andre GIS verktøy, som til dømes ArcGIS. Presentasjon av tidsseriar var også meir tilrettelagd i HEC-RAS, der forskjellige type resultatlag kan kombinerast i same tidsserie.

8.2 Samanlikningspunkt og resultat

Tidsseriegrafar for dei 7 punkta som samanliknar vassdjup og hastigheit er den mest direkte samanlikninga presentert i denne oppgåva. Det vil likevel ikkje vere grunnlag å seie kva verktøy og simulering gir riktige resultat, fordi modellane ikkje blir kalibrert eller validert. Resultat vil likevel analyserast og samanliknast seg i mellom.

Figur 55 som illustrerer resultat for vassdjup i punkt 1 viser at resultata for dei finaste berekningsnetta i MIKE 21 ligger rundt same området. Dette gjeler for berekningsnetta 30m² high order, 30m² low order og 30_15m² low order. Resultat frå berekningsnett på 10x10m med detaljområdet i HEC-RAS ligger i same området. Dette indikerer at riktige vassdjup er å finne frå disse simuleringar, gitt grensevilkår og terrengmodell er riktig. Det er verdt å merke seg at punkt 1 ligger utanfor detaljområda definert i modellane, som fører til at denne faktoren kan neglisjerast. Dei grovare berekningsnetta for HEC-RAS gir vassdjup som er vanskeleg å stole på. Dette fordi hoppet i resultata frå berekningsnettet 100x100m og 50x50m er unaturleg og feil. Årsaka til dette hoppet har truleg ein samanheng med korleis cella vert fylt. Fordi fylling av celler er styrt av eigenskapstabellar som beskriver forhold mellom volum og vasshøgde, blir lågaste område i cella fylt opp med vatn først. Desse stedane er som regel nedstrøms i cella. Når resultatpunktet er lenger oppstrøms i cella, vil det gå ganske lang tid før cella når eit nivå der punktet oppstrøms begynner å merke bidraget frå vassføringa inn. Når dette punktet er nådd, kan vasstandsnivå auke betydeleg. Dette kan forsterkast viss punktet ligger i eit lite dal, der tilføring av meir vatn fører til stort hopp fram til det trenge området er fylt. Dette problemet ville kunne løysast i stor grad viss tidsserien ville registrere eksakte verdiar for cella, som er mogeleg i begge verktøya. Problemet med dette er at senteret til cella der eksakte verdiar blir registeret varierer med tettheita på berekningsnettet som gjere det vanskeleg å bruke denne metoden ved samanlikning av berekningsnett med forskjellig tettheit.

Samanlikning av hastigheit ved punkt 1 viser ein annleis gruppering. Her blir high order simuleringar frå MIKE 21 gruppert ilag og har lågaste hastigheita. Videre er simuleringar for HEC-RAS mellom simuleringar for high order og low order. Variasjonen i hastigheit for high order gir rom for usikkerheit. Når resultata frå high order simuleringar blir sett i lys med simuleringar av finaste berekningsnett i HEC-RAS, kan det antas at desse simuleringar gir mest riktige resultat.

Resultat frå punkt 2 er noko meir eintydig for vassdjup med einaste utliggar frå simulering med berekningsnett på 100x100m i HEC-RAS. Grunnen til dette er truleg mangel på detaljområdet, da andre simuleringar frå HEC-RAS har dette. Det er også vert å merke seg at punkt 2 ligger i eit område der

detaljområde er definert. Resultat for hastigheit er også eintydig, med mindre variasjon i grovare berekningsnett frå begge verktøy.

Resultat frå punkt 3 som også er utanfor detaljområde viser liknande gruppering som ved punkt 1, der grovare berekningsnett frå HEC-RAS gjere eit stort hopp. Merkbare resultat for hastigheit er for high order simuleringar, der desse gjere store hoppe og viser til ustabilitet. Dette kan også observerast ved andre punkt, spesielt for finaste berekningsnett.

Resultat frå punkt 4 som er plassert i eit detaljområde påpeikar viktigheita av fint berekningsnett. Her er resultat frå simuleringar utført på grovare berekningsnett feil både i MIKE 21 og HEC-RAS. For HEC-RAS vedkommande er resultat frå berekningsnett grovare enn 20x20m tydeleg ugyldige, og MIKE 21 sine resultat for berekningsnetta 60m² og 100² også gir resultat som er betydeleg annleis enn dei andre simuleringar.

Punkt 5 er plassert i området der terrenget vart justert. Denne justeringa blir ikkje tatt høgde for i MIKE 21 som gjenspeilast i resultatata frå MIKE21. HEC-RAS sine resultat underbyggjer det som vart diskutert for punkt 1 og 3, der trenge dal kan føre til store hopp for større cellestørrelsar. Dette igjen har truleg ein samanheng med at punktet ligger i område utan definerte detaljområde.

Resultat vist på figur 65 og 66 er frå ein plass der detaljområdet blir brukt. Det er merkbart at resultat frå dei finaste berekningsnett på tvers av verktøy samsvarer ganske eksakt.

Resultat frå punkt 7 som ligger i eit krevjande område viser at HEC-RAS sine grovare berekningsnett ikkje klarer å handtere dette området. Punktet byr på problem for grovare berekningsnett i MIKE 21 også. Her blir det vanskeleg å seie noko om kva resultat er mest riktig. Det er merkbart at berekningsnettet på 30m² high order gir store hopp i resultatata, mens resultat frå same berekningsnett med low order gir eit utlikna versjon av same graf. Dette tydeleggjere at high order betyr ikkje nødvendigvis meir presise resultat.

8.3 Brukaroppleving og område av bruk

Eit verktøy bør ikkje definert berre utifrå kva den nyttar å gjere ved tiltenkt bruk, men også kor lett den tiltenkte bruken er å lære for nye brukarar. Om tilgangen til verktøyets funksjonalitet er tungvind og trengjer mange steg kan dette skape hovudbry for brukarar. Eit annet viktig aspekt ved verktøyet er kva type støtteorgan finnast for å hjelpe brukarar når dei møter på nye problem eller slitar med å få ein funksjon til å fungere. Dette blir omtalt vidare i dette delkapittelet, med kort oppsummering av brukaroppleving og verktøyas opplevde styrkar og svakheiter.

Begge verktøy har høg grad av kompleksitet som kandidaten berre har fått ein smakebit frå gjennom masterperioden. Dei opplevde styrkar og svakheiter kan vere preget av brukarfeil, der den tiltenkte eller mest effektive bruken av verktøyet ikkje vart brukt. Dette igjen fordi kandidaten ikkje har tidlegare erfaring frå verktøya analysert. Vurdering av brukarvenlegheita til begge verktøy vil vere frå eit ståpunkt

der brukaren ikkje har tidlegare erfaring med verktøya og opplæring av bruken skjer ved ressursar fritt tilgjengelege på nettet og intuitivt prøving og feiling. Det bør nemnast at kandidaten har ein viss kjennskap til strukturoppsett til analyseverktøya grunna tidlegare erfaring med DAK og CAD modelleringsverktøy.

Før diskusjonen vert retta mot spesifikke aspekt av brukaroppleving, må eit viktig aspekt nemnast. HEC-RAS er eit open source verktøy som innebere stor grad av transparens. Videre betyr dette også at HEC-RAS er gratis å laste ned og bruke, som gir verktøyet ein fordel med tanke på mengde brukarar. Har verktøyet eit større gruppe brukarar kan dette gi rom for meir flyt av informasjon og rettleiingar av riktig og alternativ bruk av verktøyet (dette frå brukarar av verktøy). Dette var noko kandidaten opplevde i møte med verktøya. Her er det betydeleg forskjell i aktiviteten i forskjellige forum eller opplastingar av informative video på youtube, der HEC-RAS har tydeleg meir aktivt miljø. Dette er ein viktig del av støtteorgana til HEC-RAS. MIKE 21 har til gjengjeld ein støtteavtale brukarar kan inngå med DHI for ein viss sum. Ein son type avtale har store fordel, der støtta er skreddarsydd for gitte problem og bruken av tid for å løyse problemet har potensialet til å minimerast kraftig.

Ein del av støtteorgana til verktøyet er aktiviteten av brukarmiljøet og den andre delen er aktiviteten av gruppe utviklarar som står bak verktøyet. Når verktøylisensen kostar vil også kursing og opplæring oftast ikkje vere gratis. Dette er tilfellet for MIKE 21, der DHI har kurs for dei forskjellige funksjonar i verktøyet, dette til ein viss summe. Tilgang på kursing er ein stor fordel for nye brukarar, men kan også føre til mindre transparens frå verktøyet side. Dette er gjerne mest tydeleg når nye funksjonar blir lansert i form av webinar, der brukarar får ein smakebit av funksjonen, men full bruk og opplæring gis på kurs. Dette gjenspeilast i generelle brukarrettleiingar på verktøyet side. Her er forskjellane store, der HEC-RAS har ein ryddig og brukarvenleg nettside dedikert til brukarstøtte med detaljerte rettleiarar. Dette er ikkje tilfellet på DHI sine sider. Her kan dokumentasjonen virke lite oversikteleg, med ein del overlapp eller fleire versjonar av beskriving.

Dette har truleg ein samanheng med fakta at verktøyet MIKE er delt opp i modular for å tilpasse prising av berre nødvendig funksjonalitet. Denne fragmenteringa av verktøyet er noko kandidaten merka når funksjonen Multi-cell Overland Solver i MIKE 21 (ikkje MIKE 21 Flow Model FM) skulle utprøvast. Etter å ha bygget modellen blei kandidaten møtt av feilmelding (lisens manglar) når simuleringa skulle køyrast. Denne fragmenteringa har fleire praktiske årsak enn berre sal av nye modular/oppdateringar, som til dømes grunnar relatert til den program-tekniske strukturen av korleis verktøyet er bygd opp.

Måten MIKE 21 er strukturert på har fleire fordel når det gjelder hovudvindaug for simuleringsoppsett. Både høgre og venstre marg er intuitive og oversiktelege. Dette gjelder for prosjekt-utforskar på høgre side som liste opp prosjektrelaterte filar og modelloppsett på venstre side. I kandidatens oppleving var midten eller hovudområde på vindaug ikkje brukt i noko betydeleg grad. For å nytte heile skjermen kan skjermen delast opp i fleire vindaug, som løyser problemet til ein viss grad. Ein oversikteleg prosjektutforskar er noko HEC-RAS løyser ved å introdusere RASMapper. I RASMapper blir data for modellbygging og resultat samla i same vindaug, noko som gjere det veldig oversikteleg og brukarvenleg. Resultat i MIKE 21 blir presentert i separate vindaug, noko som fører til ein del hopping.

Tidsbruken er eit viktig aspekt i modelleringa. Her var erfaringar frå HEC-RAS overraskande. Ved finaste berekningsnett (10x10m_2x2m) og bruk av full grunt vatn likningar kunne verktøyet bruke 8-9t på simulering. Dette var meir enn forventa. Ved finaste berekningsnett (maks triangelareal på 30²) i MIKE 21 kunne verktøyet bruke rundt 3t på simulering. Her må det nemnast at maks triangelareal ikkje vart overheldt over heile feltet, der trianglar vart forstørra i problemområde. Videre vart berekningsnett forsøkt køyrt med maks tettheit på triangelareal 15m², der ingen simulering kunne køyrast stabil. Simuleringar frå berekningsnett med maks triangelareal på 30² var krevjande å få til å køyre stabil, der 4 trianglennett alternasjonar måtte gjerast etter at første simulering krasjet.

Generering av resultat var meir krevjande i MIKE 21, der high order integrasjon av tid og rom viste seg å vere vanskeleg for mindre berekningsnett. Simuleringar ville ofte resultere i blow-ups, der kritisk Courants tall blir passert. Ved inspeksjon av loggfil, blir problemområda lista opp. Etter at trianglar i problemområdet vart forstørra var det ikkje uvanleg at andre problemområde dukka opp, i nokre tilfelle ved ein tidlegare tidssteg. Dette var ein kjelde til frustrasjon, da i mange tilfelle kandidaten ikkje evna til å finne logisk forklaring på introduksjon av nye blow-ups.

Den samla brukaroppleving av HEC-RAS var veldig tilfredsstillande. Verktøyet er intuitiv å bruke og har god støtteorgan som gjere det lett å finne informasjon om funksjonar og rettleing i bruken av disse. Videre er verktøyet i større grad sjølvforsynt, der behovet for andre verktøy til terrengjustering eller presentasjon/analyse av resultat er betydeleg mindre enn den for MIKE 21. MIKE 21 har til gjengjeld oversikteleg prosjekt-utforskar og simuleringssoppsett, men har manglande støtteorgan som er fritt tilgjengeleg. Ved å inngå avtale om brukarstøtte og kursing vil dette behovet bli møtt i større grad.

Oppsummering av brukaroppleving og andre konkrete faktorar/parameter frå begge verktøy er lista opp under.

Faktorar	HEC-RAS	MIKE 21
Import av data: terrengdata, terrenglagdata og avgrensande polygon	God	Middels
Redigering og danning av modelldata: terrengdata/berekningsnett og data for grensevilkår	God	Dårleg
Presentasjon og redigering av resultat: WMS-lag, partikkel tracking, 3D presentasjon, modifikasjon av resultatlag og KML eksport	God	Dårleg
Intuitivitet: korleis fungerer denne funksjonen, kor finner eg denne funksjonen, kva resultat får eg ved denne funksjonen, kva kan resultatet brukast til? Er funksjonar og filar strukturert oversikteleg?	God	Middels
Fritt tilgjengeleg støtteorgan	God	Dårleg
Kursing og støtteavtale	Dårleg	God
Simuleringstid	Dårleg	God
Berekna arbeidsmengde	God	Dårleg
Lisenskostnad	God	Dårleg

Tabell 4: Samanlikning av faktorar ved begge verktøy. Her er klassifisering God (grøn), Middels (oransje) og Dårleg (raud).

Begge verktøy vil vere i stand til å bidra kommunar eller konsulent med hydraulisk modellering av overvatn. Behova lista på figur 3 vil kunne møtast av begge verktøy med unntak av produksjon av eit DV kart i MIKE 21. Dette var noko kandidaten ikkje såg mogelegheita for i MIKE 21. Som nemnt tidlegare, vil dette likevel kunne oppnåast ved å bruke andre GIS verktøy. HEC-RAS har programdefinerte resultatlag som kan enkelt leggjast til resultatata. DV kart er ein av desse mogelegheita.

Det er alltid utfordrande å samanlikne to kompliserte verktøypakkar som har forskjellig bakgrunn og er utvikla av to forskjellige bedrift. Dette resulterte i at definisjon av klar prosedyre på forhand var vanskeleg å definere. Mykje blir til i modelleringsprosessen, der resultat og parameterval i det eine verktøyet påverke vala i det andre. Det var vanskeleg å avgrense oppgåva. Modellering tok lang tid, der heile simuleringa måtte gjerast på nytt om ein parameter viser seg å måtte bli introdusert eller var gløymd. Mykje av forståinga av korleis ein vil at resultat skal bli er avhengig av andre faktorar.

8.4 Videre arbeid

Under bygging av modell vart fleire tilpassingar og innføringar av nye parameter introdusert. Mengde nye parameter som kan introduserast er i teorien grenselaus, der modellen alltid har kapasitet å utbetrast. I dette delkapittel vil det bli gitt ein kort beskriving av kva kandidaten syntest hadde vore interessant å utforske vidare.

- Kalibrering og validering av resultatmodell frå begge verktøy. For å kunne samanlikne kor pålitelege resultat verktøyane evnar å produsere, ville det vert nyttig å kalibrere modellane mot historiske flaumhendigar i feltet. Videre ville det vore interessant å sjå korleis kalibrert modell oppfører seg i andre felt av lik karakter.
- Introduksjon av fleire parameter: infiltrasjon, meir eksakte mannings verdiar, kopling av eit 2D modell med eit 1D modell – enten elv/kanal modell eller leidningsnett
- Utarbeide metodikk for å finne strømmingsdefinerande objekt. Fordi dagens teknologi gir høgoppløyslege høgdedata, ville det vore interessant å sjå korleis desse dataa kan utnyttast til sin fulle potensial i hydraulisk modellering. Dette særleg med tanke på definisjon av objekt som er med på definere strøyming.
- Kartleggje eksisterande og tenkt bruk av hydraulisk modellering i kommunar og konsulentbransjen. Dette ved å intervjuar forskjellige aktørar i fagfeltet.

9 Konklusjon

I denne oppgåva vart 2D hydrauliske modelleringsevna til HEC-RAS og MIKE 21 samanlikna. Dette vart gjort for å sjå om verktøya kan effektivt brukast til hydraulisk modellering av overvatn i urbane felt. Ved å introdusere fleire parameter i samanlikninga kan det konkluderast med at:

- Begge verktøy er i stand til å møte dagens behov i hydraulisk modellering av overvatn.
- MIKE 21 manglar funksjon for generering av DV kart, der bruk av andre GIS verktøy må nyttast for dette formål.
- Resultatredigering i HEC-RAS gir stor friheit i presentasjon av resultatlag.
- Tettheita på berekningsnett har stor innflytelse på resultatata og simuleringstid.
- HEC-RAS brukte lenger tid på simuleringar ved full grunt vatn likningar.
- Terrengjustering i MIKE 21 er problematisk, men ikkje problematisk i HEC-RAS.
- Bruk av grovare berekningsnett i HEC-RAS kan føre til feil vassdjup når interpolerte verdier registrerast.
- HEC-RAS er meir brukarvenleg frå eit nybegynnar perspektiv og har kapasitet til å gi større friheit for meir erfaren brukar.

10 Kjelde

- Ahn, J., Na, Y., & Park, S. W. (2019). Development of Two-Dimensional Inundation Modelling Process using MIKE21 Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(9), 3968-3977.
<https://doi.org/10.1007/s12205-019-1586-9>
- Berkhahn, S., Fuchs, L., & Neuweiler, I. (2019). An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods. *Journal of Hydrology*, 575, 743-754.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.066>
- Brunner, M. G. W. (2020). Hydraulic Reference Manual 6.0 Beta. *U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center*.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest>
- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1293-1302.
<https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>
- COWI. (2015). Overvannsarbeid i utlandet. Virkemidler for å redusere nedbørbetinget oversvømmelse i urbane områder. *Oppdragsrapport M-316/2015, Miljødirektoratet*.
- Engineers, U. S. A. C. o. HEC-RAS Mapper User's Manual 6.2. *Hydrologic Engineering Center*.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/latest>
- Engineers, U. S. A. C. o. HEC-RAS User's Manual 6.2. *Hydrologic Engineering Center*.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>
- ESRI. *What is Lidar data?* <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.7/help/data/las-dataset/what-is-lidar-.htm>
- Friborg, T. G. D. (2018). Overvannskartlegging Nadderud. *Teknisk rapport: Sweco*.
- .
- Guo, K., Guan, M., & Yu, D. (2021). Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(5), 2843-2860.
<https://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>
- Göteborg kommun. (2022). *Dagvattentaxa*. <https://goteborg.se/wps/portal/start/vatten-och-avlopp/avgifter/dagvattentaxa>
- Høylye, S. S. (2021). *Samfunnsøkonomisk vurdering av lokal fordrøyning av overvann og dimensjonerende nedbør. En case-studie i Bærum kommune Norges miljøl- og biovitenskapelige universitet*].
- Jakob Bork, L. G. (2019). Styrtregn i Bærum 07.08.2019. *METinfo*.
- Jönköping kommun. *Avgift för dagvatten*.
<https://www.jonkoping.se/byggabomiljo/vattenochavlopp/fordigsomvattenochavloppskund/avgiftfordagvatten.4.74fef9ab15548f0b8002373.html>
- Kartverket. (2022). *Status for nasjonal detaljert høydemodell*.
<https://www.kartverket.no/geodataarbeid/nasjonal-detaljert-hoydemodell/status-hoydemodell>
- Klimaservicesenter, N. *Klimapåslag for Blindern*.
<https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN18701>
- Klimaservicesenter, N. *Stasjonsinformasjon*. <https://seklima.met.no/stations/>
- Mignot, E., & Dewals, B. (2022). Hydraulic modelling of inland urban flooding: recent advances. *Journal of Hydrology*, 127763. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127763>
- Noregs vassdrags- og energidirektorat, N. (2022). Rettleiar for handtering av overvatn i arealplanar.
https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022_04.pdf

- NOU:16. (2015). Overvann i byer og tettsteder - Som problem og ressurs. [Utredning]. Oslo: Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon. bit.ly/38apYO1
- SCALGO. About Us. <https://scalgo.com/en-US/about>
- SCALGO. Country Specific - Norway. <https://scalgo.com/en-US/scalgo-live-documentation/country-specific/norway>
- SCALGO. (2018). Launch of SCALGO Live Norway. <https://scalgo.com/en-US/news-item/launch-of-scalgo-live-norway>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201-216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

11 Vedlegg 1

$$\tau_b = \rho C_D |V|V \quad (1)$$

der

ρ = vatn tettheit

C_D = dragkoeffisient, berekna ved Mannings

$$C_D = \frac{n^2 g}{R^{1/3}} \quad (2)$$

der

n = Mannings koeffisient

R = hydraulisk radius

g = tyngdeakselerasjon

$$c_f = \frac{C_d}{R} |V| = \frac{n^2 g}{R^{4/3}} |V| \quad (3)$$

$$f_c = 2\omega \sin\varphi \quad (4)$$

der

$\omega = 0.00007292115855306587$ er jordas vinkelhastighet og φ er breddegrad.

$$v_t = \mathbf{D}u_* h + (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

der

\mathbf{D} = miksing koeffisient

u_* = skjærhastighet

h = vassdjup

C_s = Smagorinsky koeffisient

Δ = filter bredde lik lokal gridtettheit

$|\bar{S}|$ = tøyingshastighet

$$V = -\frac{R^{\frac{2}{3}} \nabla z_s}{n |\nabla z_s|^{1/2}} \quad (6)$$

der

V = hastighetsvektor

R = hydraulisk radius

∇z_s = høgda på vassflate gradient

n = Manningstallet

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla z_s) + q \quad (7)$$

der

$$\beta = \frac{R^{\frac{2}{3}} h}{n |\nabla z_s|^{1/2}} \quad (8)$$

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta X} \quad (9)$$

der

C = Courant nummer

V = flaum bølge hastighet

ΔT = tidssteg

ΔX = gjennomsnittleg cellestørrelse

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = C_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (10)$$

der

C_f = dragkoeffisient

$\vec{u}_b = (u_b, v_b)$ = strøymingshastighet over terrenget

$$C_f = \frac{g}{C^2} \quad (11)$$

$$C_f = \frac{g}{\left(Mh^{\frac{1}{6}}\right)^2} \quad (12)$$

$$f = 2\Omega \sin\varphi \quad (13)$$

der

Ω = er jordas vinkelhastighet og φ er geografiske breddegrad

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (14)$$

der c_s er konstant, l er karakteristisk lengde og deformasjonsraten er gitt ved

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (16)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 * h^2} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 * h^2} = 0 \quad (18)$$

der

$\zeta(x, y, t)$ = vassflate høgde

t = tid

p og q = hastigheitskomponentar i x og y retning

$h(x, y, t)$ = vassdjup

g = tyngdeakselerasjon

$d(x, y, t)$ = tidsvarierende vassdjup

C = Chezy motstand

x, y = kartesiske koordinatar

$$CFL_{hd} = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (19)$$

der

h = høgde på vassoverflate

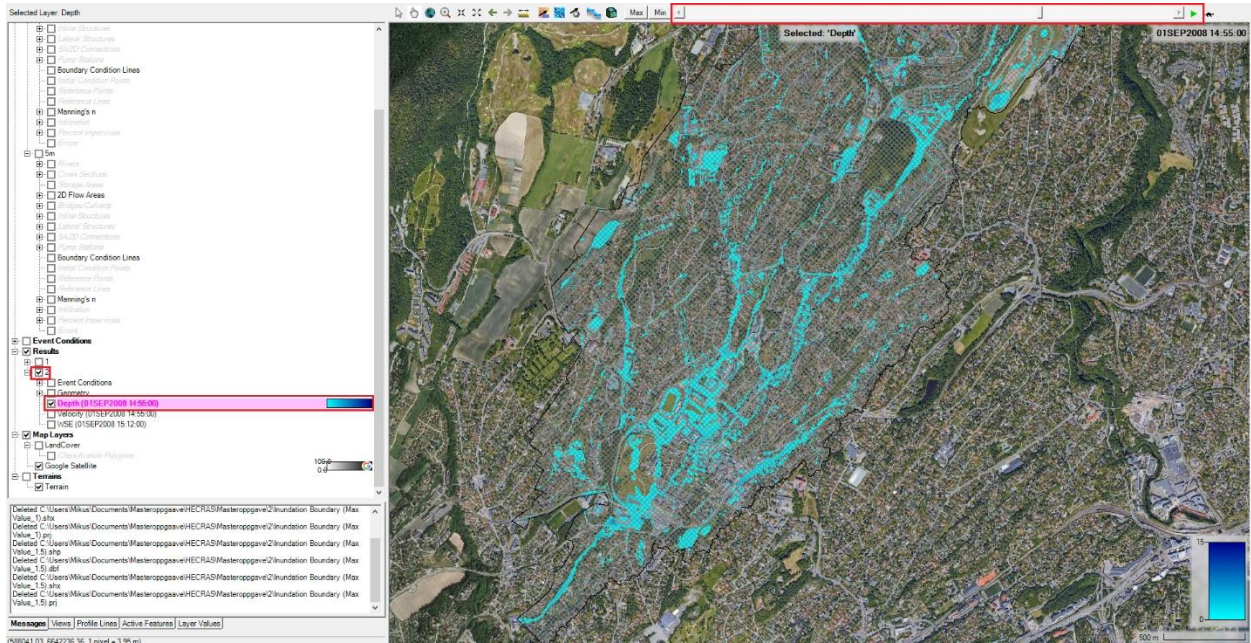
u og v = hastigheitskomponent i x og y retning

g = tyngdeakselerasjon

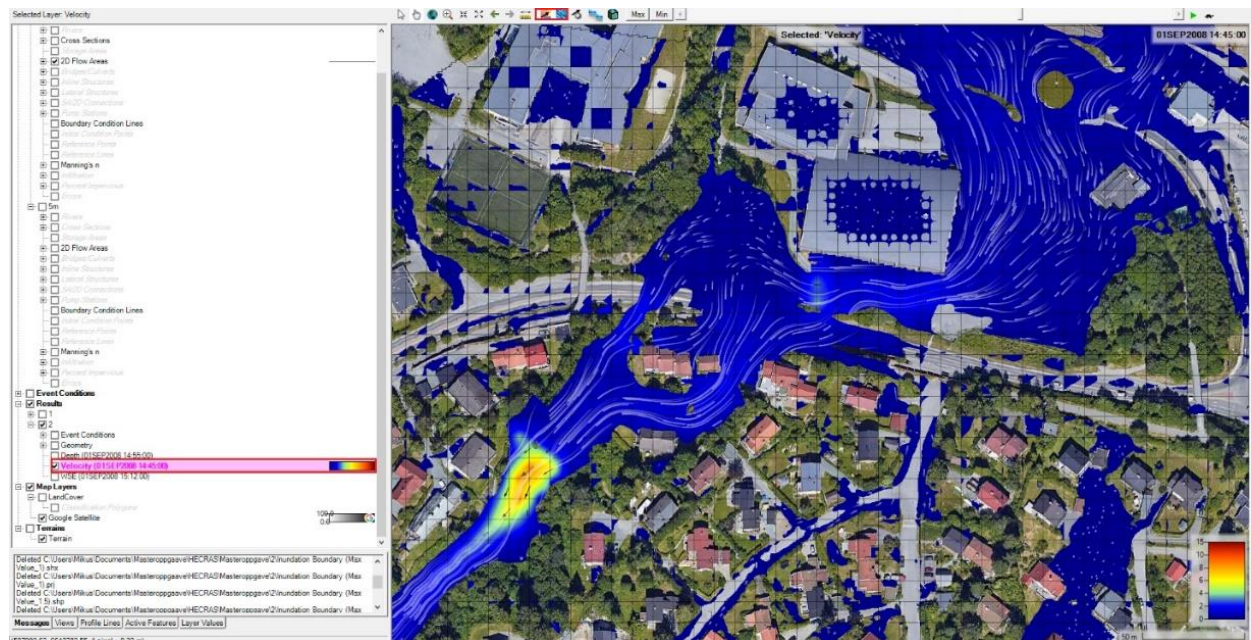
Δx og Δy = karakteristisk lengdeskala i x og y retning

Δt = tidsintervall

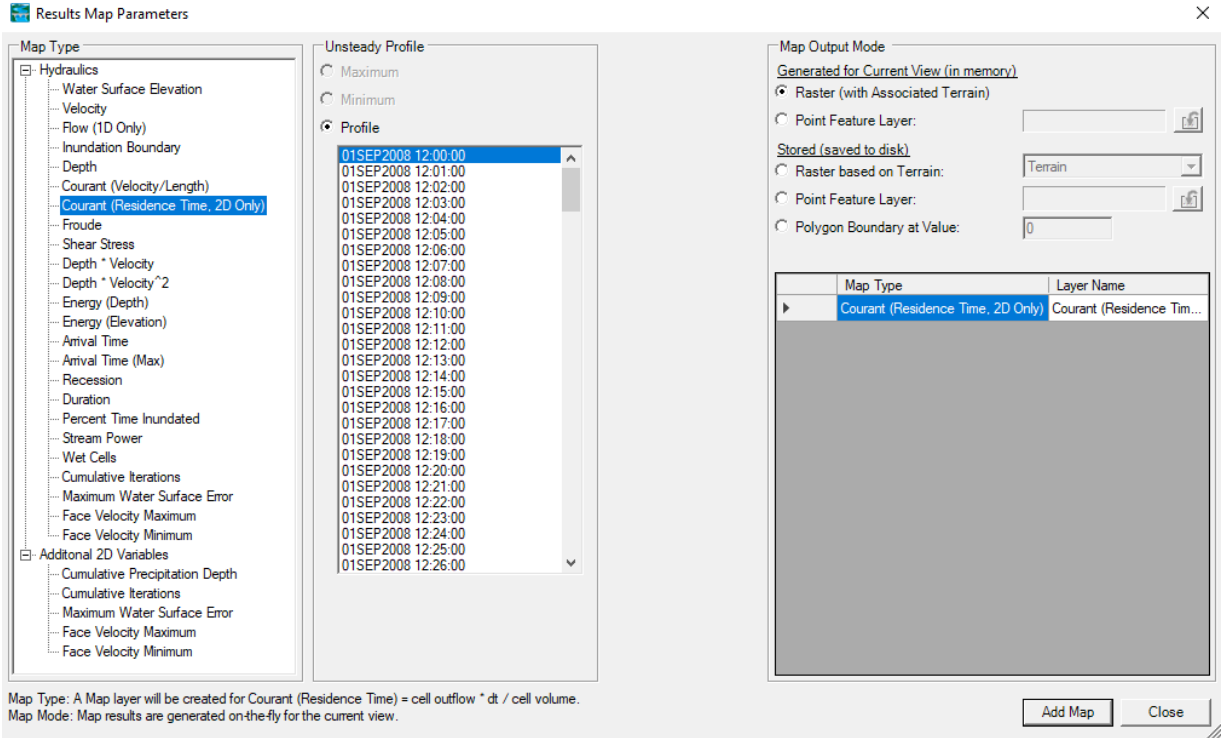
12 Vedlegg 2



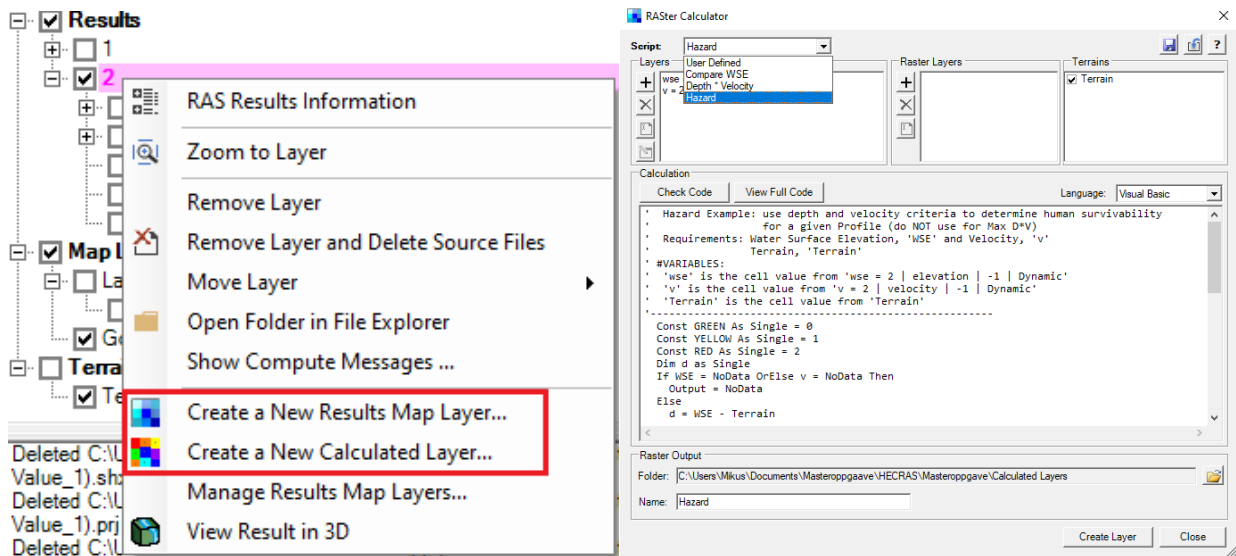
Figur 57: Illustrasjon av korleis resultatlag skurast på og endring av aktivt tidssteg



Figur 58: Resultatframvising med particle tracking



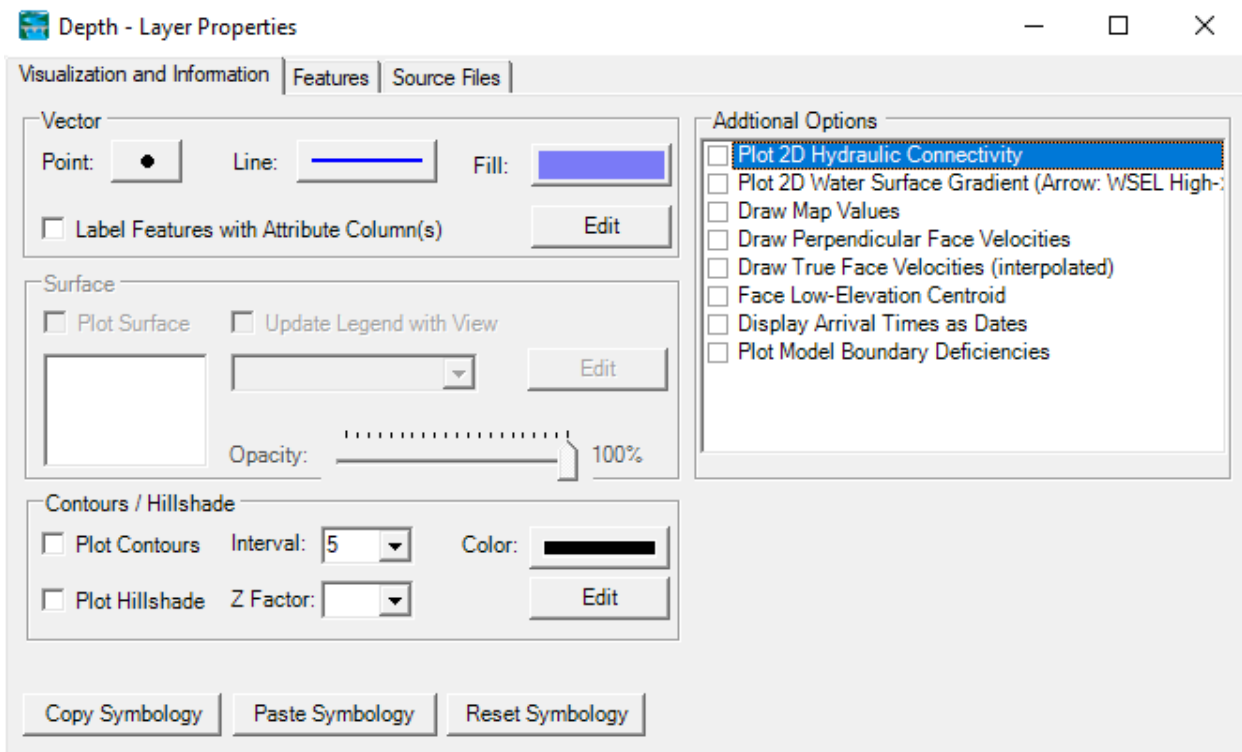
Figur 59: Oppretting av dynamisk kart for Courant nummer



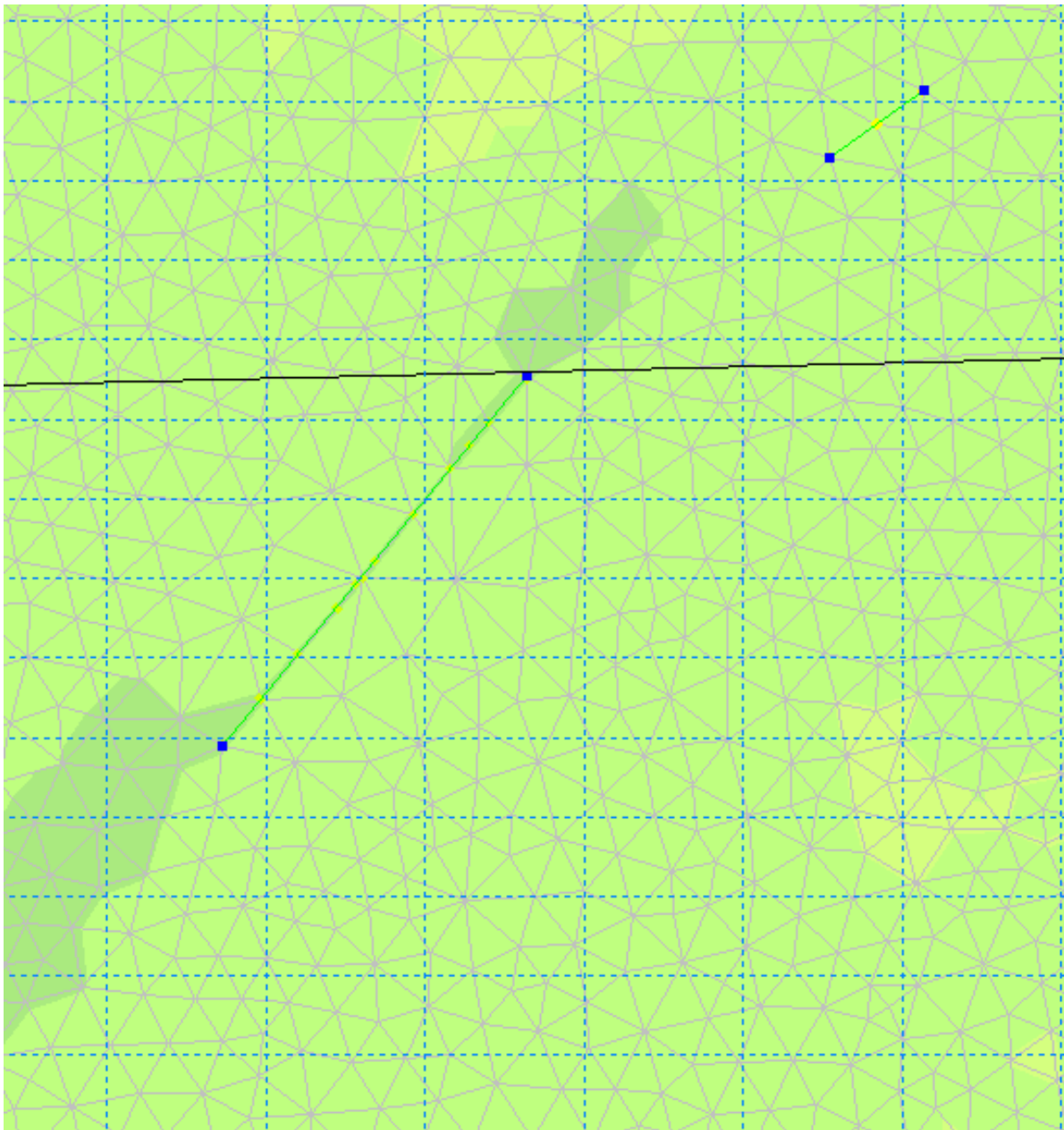
Figur 60: Oppretting av kalkulererte resultatlag



Figur 61: Resultatframvisning i Google Earth

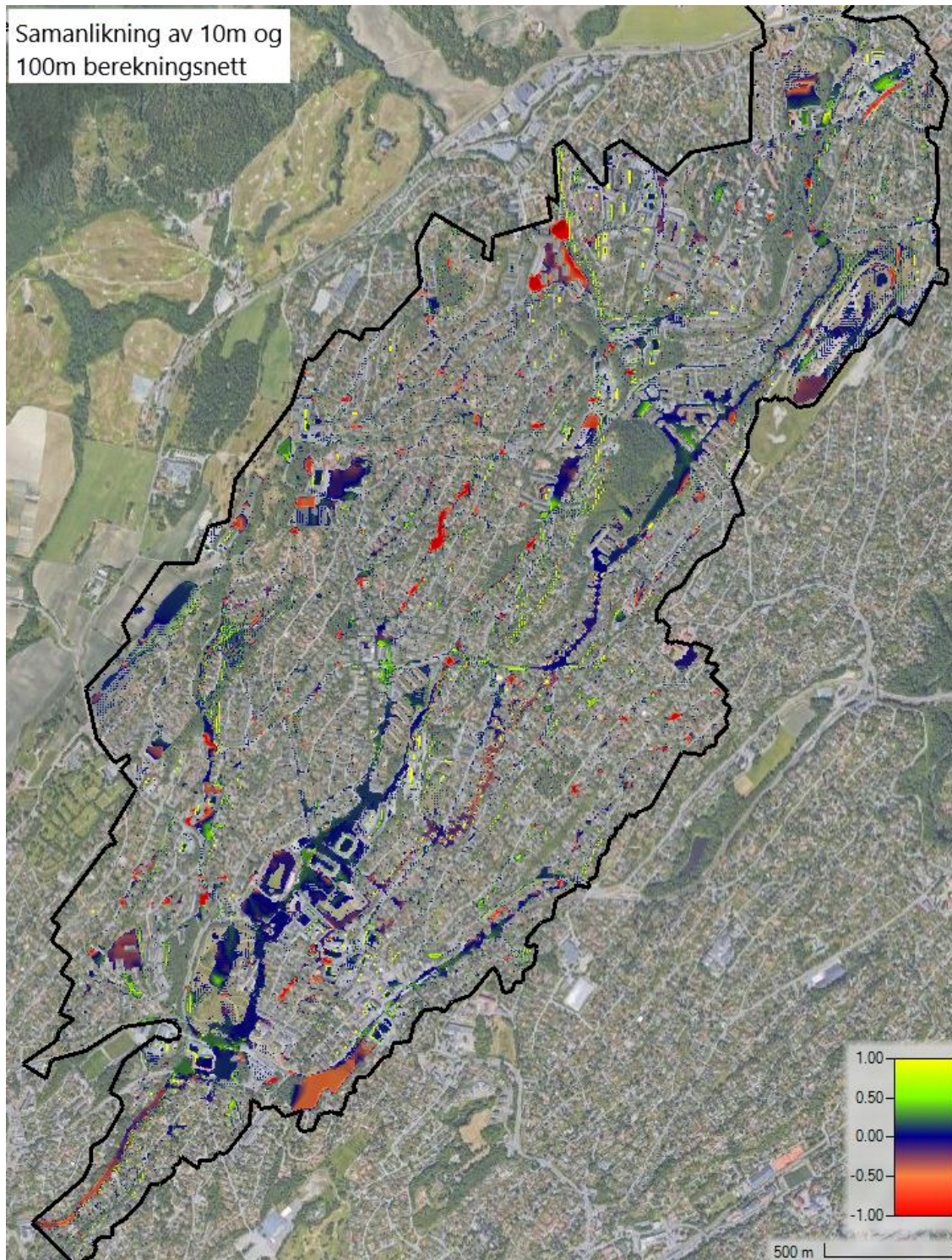


Figur 62: Eigenskapsvindauge for resultatlag

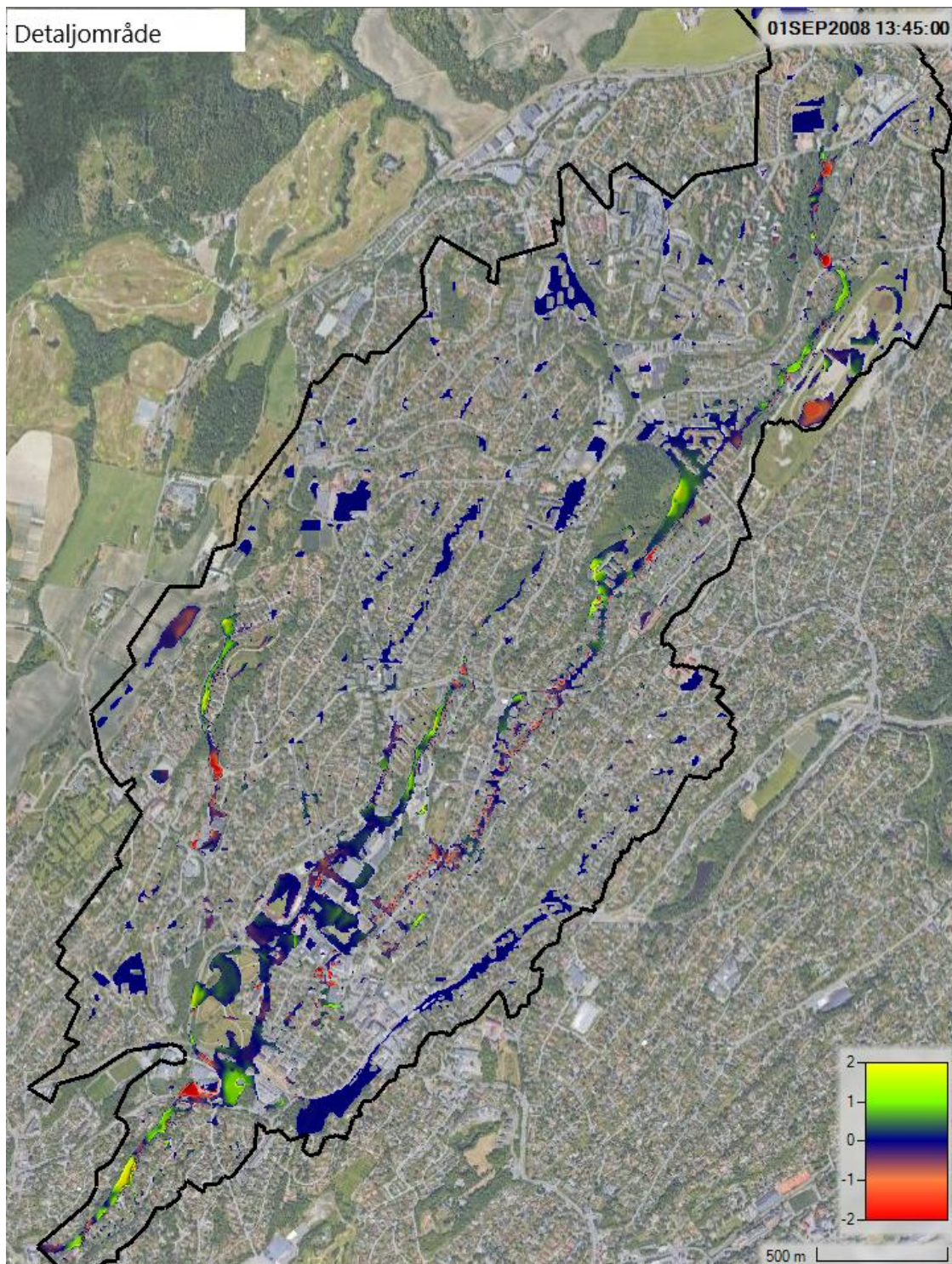


Figur 63: Justering av terreng rundt punkt 5 i MIKE 21. Grøn linje viser kulverten som skal justere terrenget ned til kulverløpet.

13 Vedlegg 3

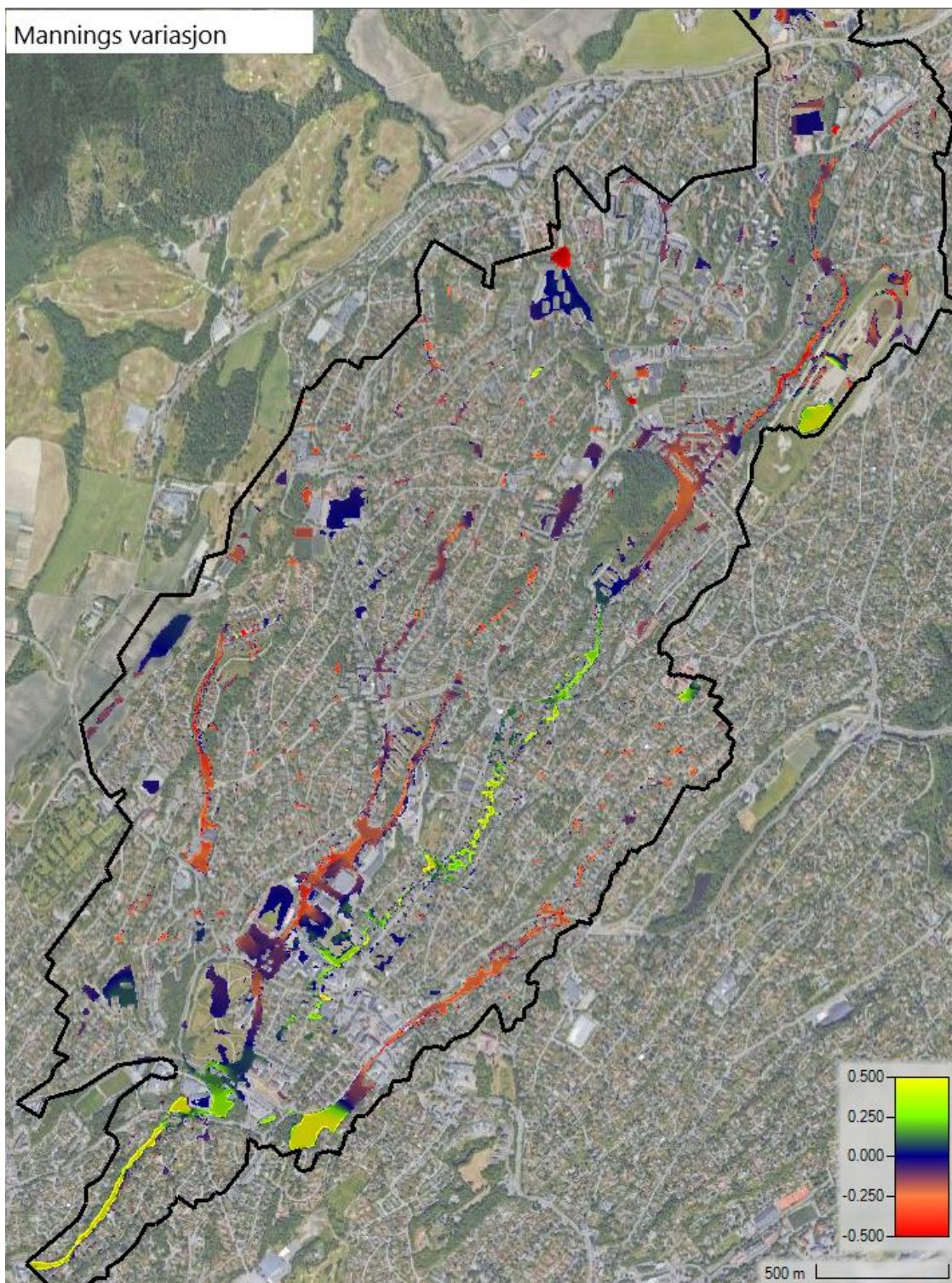


Figur 64: Samanlikning av berekningsnett med cellestørrelse på 10x10m og berekningsnett med cellestørrelse på 100x100m der begge berekningsnett har detaljområde.



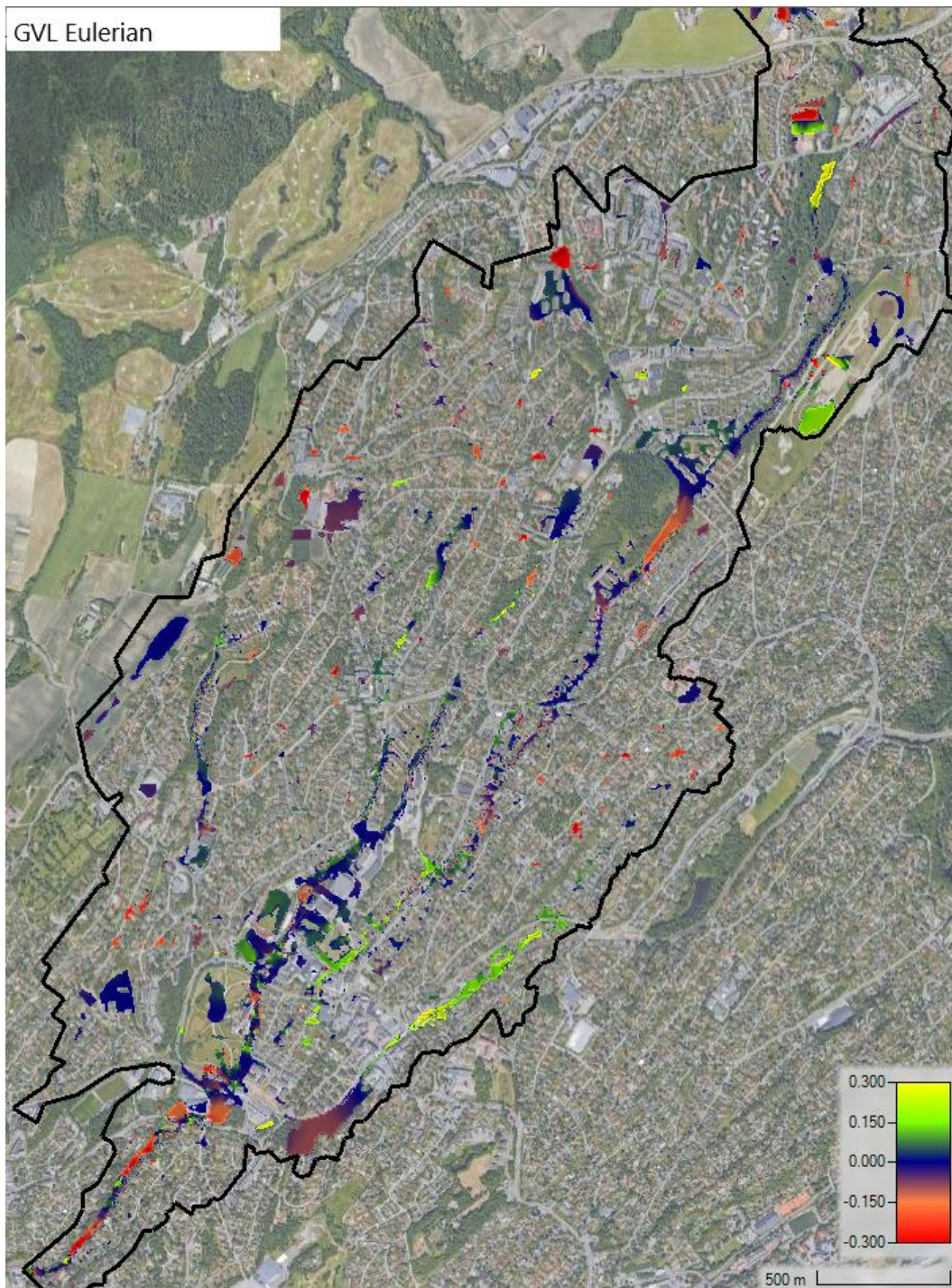
Figur 65: Samanlikning av vassdjup for eit uniform berekningsnett med 100x100m store celler med eit berekningsnett på 100x100m med detaljområde på 20x20m store celler (berekingsnett 100_20).

Dette er eit referanseresultat der same forhold blir samanlikna som på figur 32, berre med betydeleg grovare berekningsnett. Her går differansane i vassdjup opp mot 2m.



Figur 66: Samanlikning av vassdjup for berekningsnett 100_20 med og utan varierte mannings verdi

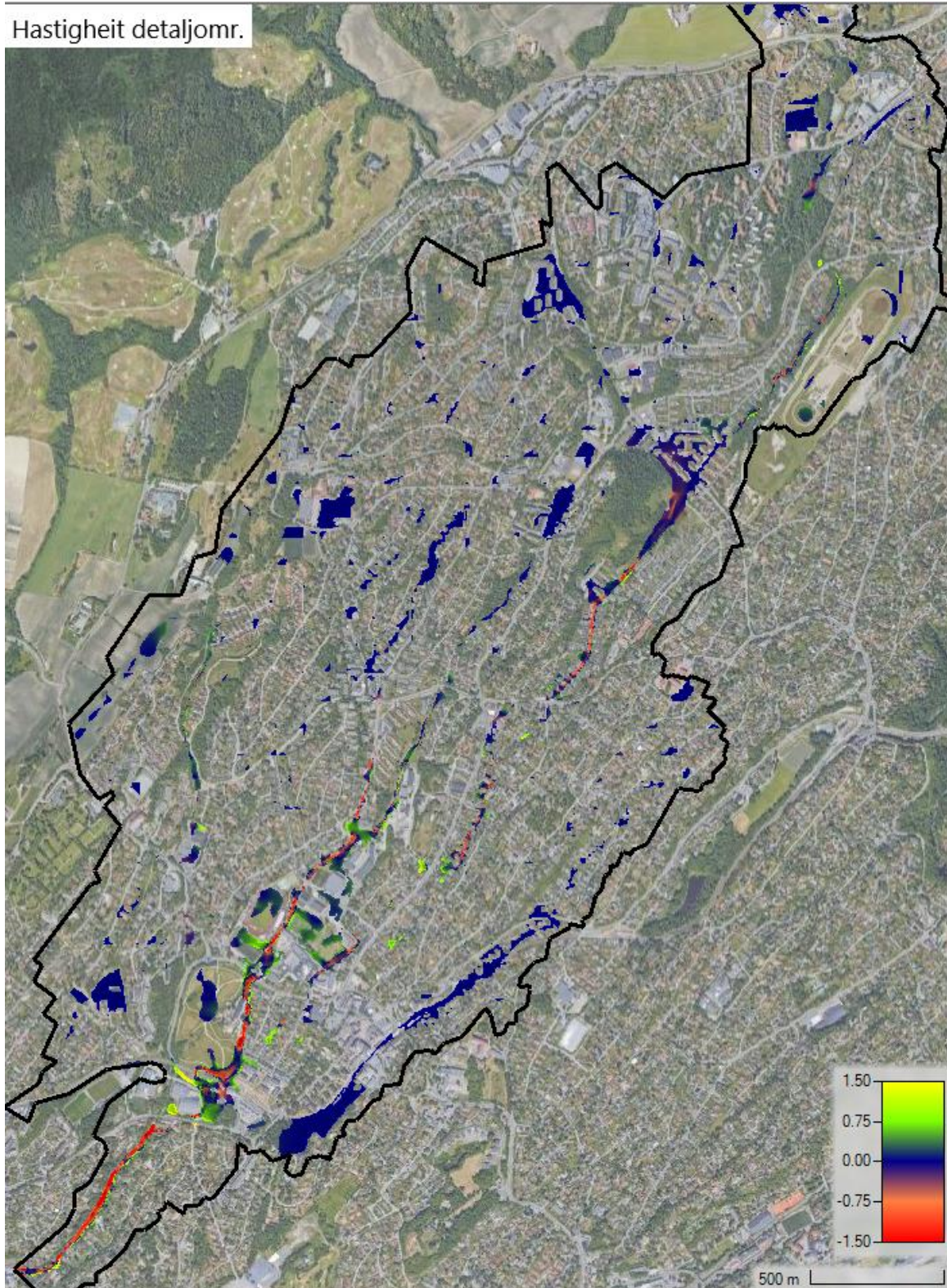
Dette er i forlenging av resultat på figur 33, vist på eit grovare berekningsnett.



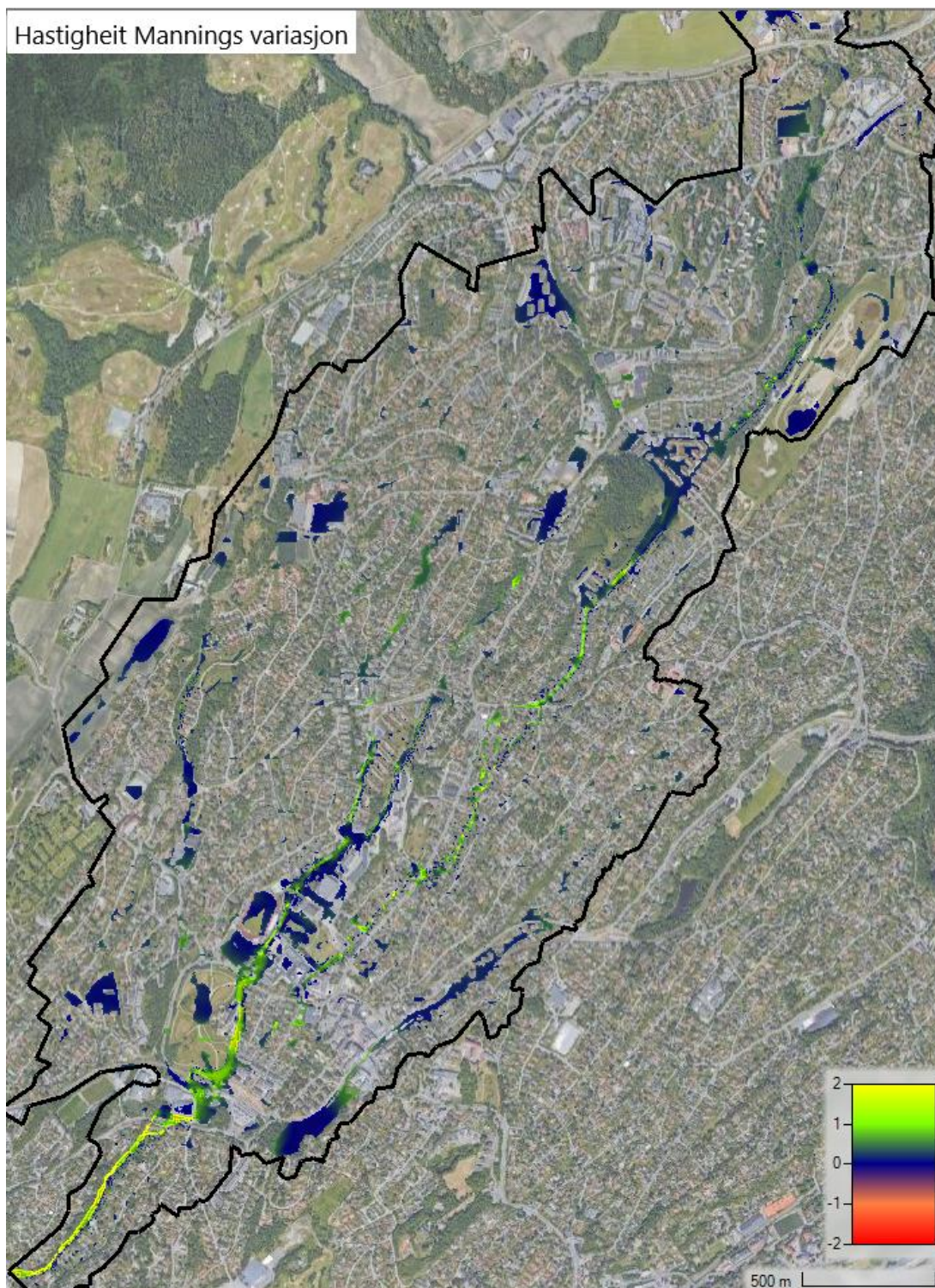
Figur 67: Samanlikning av vassdjup for berekningsnett 100_20 berekna med likningssett for diffusiv bølge samanlikna med same berekningsnett, men løyst med likningssett for heile grunt vatn likningar

Dette er i forlenging av resultat presentert på figur 34, men på eit grovare berekningsnett.

Hastighet detaljomr.

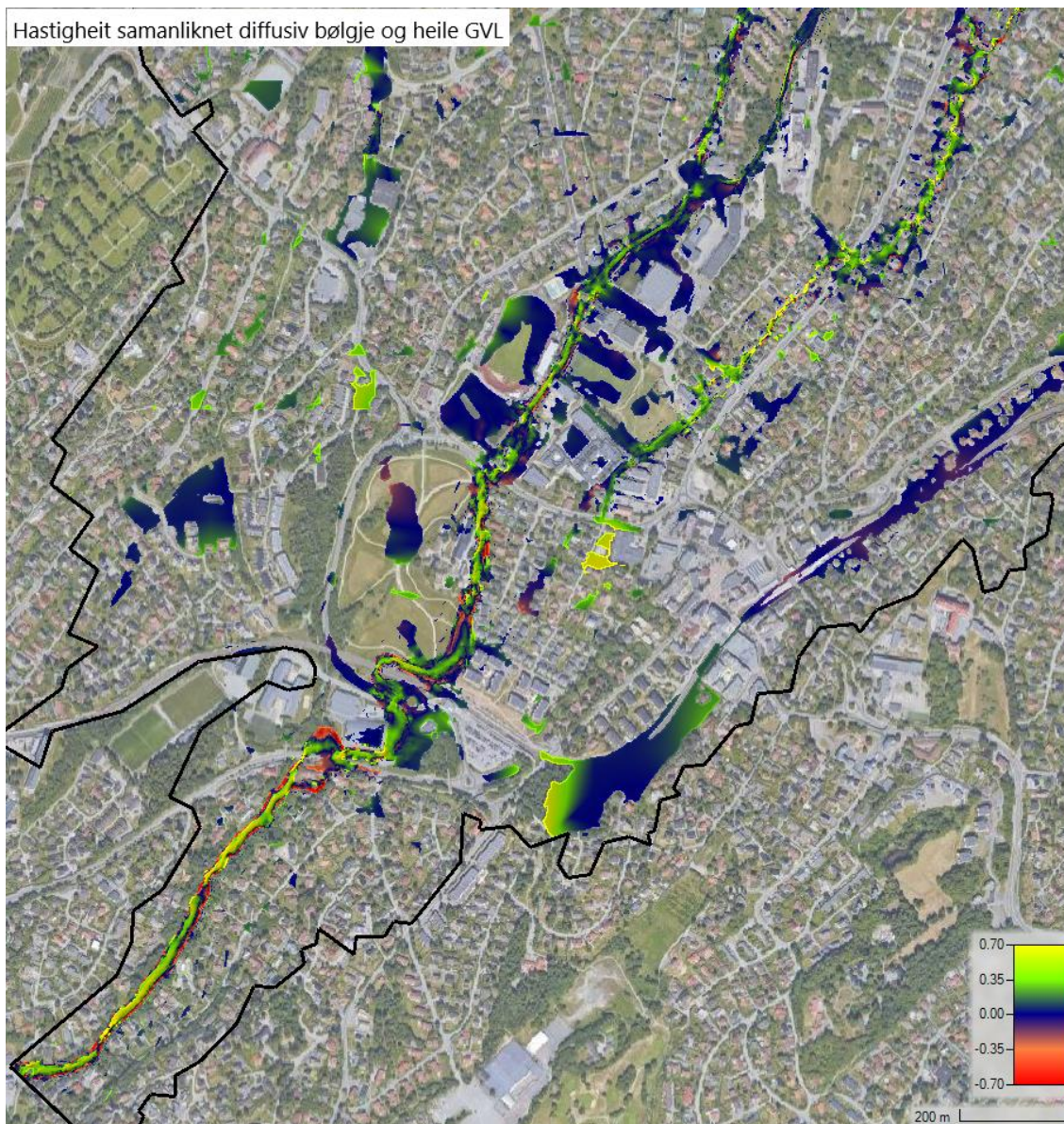


Figur 68: Samanlikning av eit uniform nett med 100x100m store celler og eit nett med 100x100m store celler for hovudområdet og 20x20m store celler for detaljområdet.



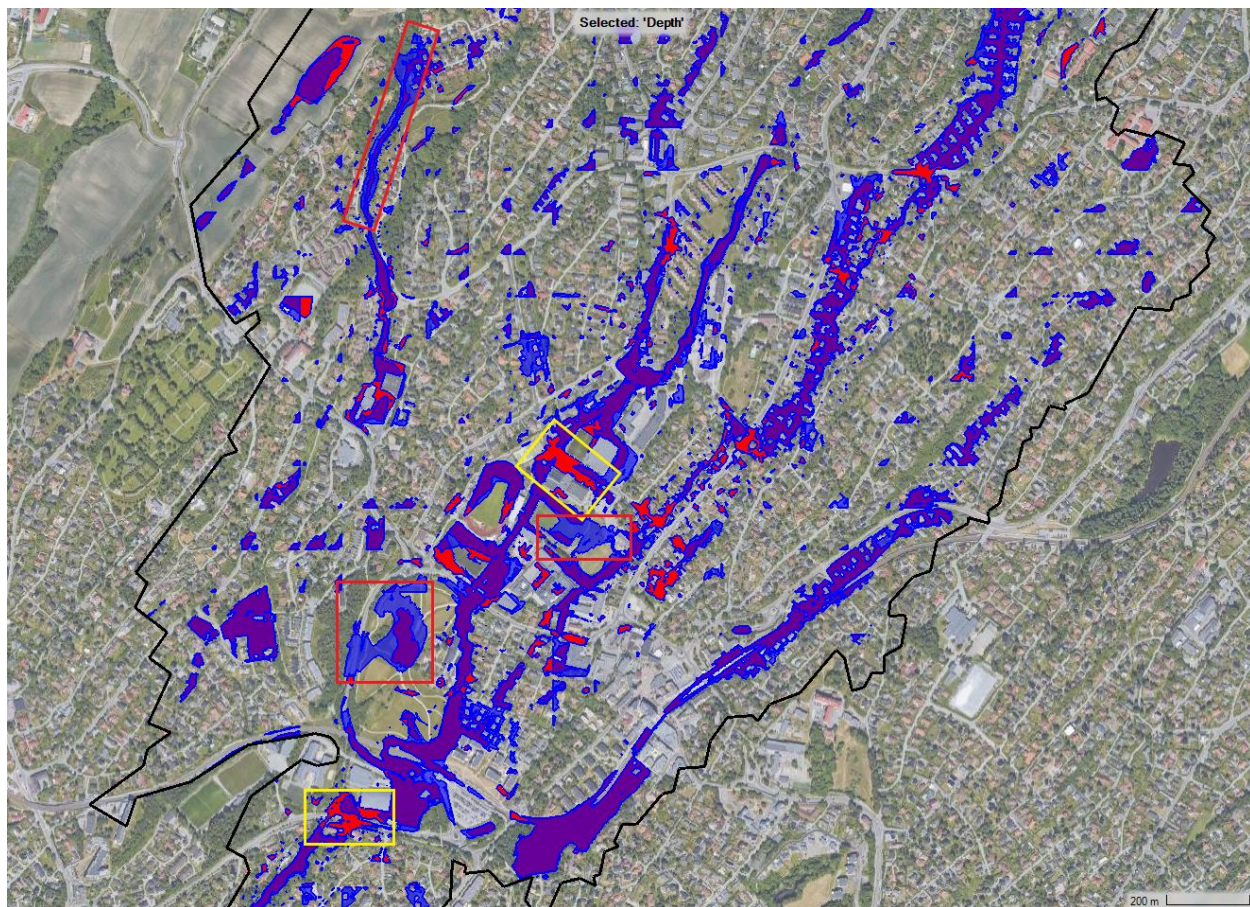
Figur 69: Samanlikning av hastighet for berekningsnett 100_20 med og utan varierte mannings verdi

Figur 69 presentere resultat i forlenging av det som vart presentert på figur 36. Forskjellen her er at berekningsnett brukt for denne samanlikninga er 100_20 og ikkje 10_2. På figuren er det tydeleg at konstant mannings n verdi på 0.15 fører til lågare hastighet enn variert mannings n verdi.



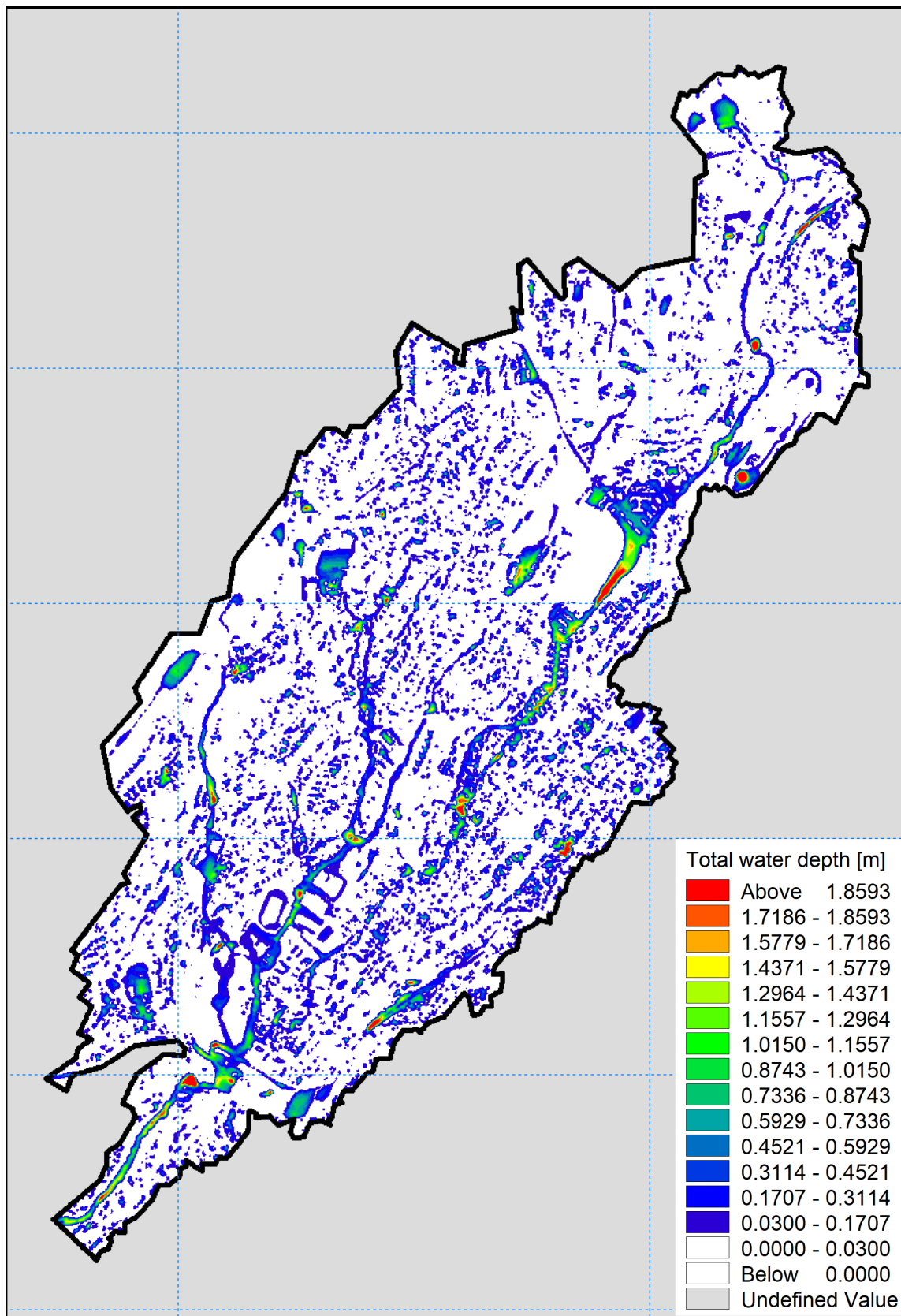
Figur 70: Samanlikning av hastighet for berekningsnett 100_20 berekna med likningssett for diffusiv bølge og heile grunt vatn likningar (Eulers metode).

Figur 70 presentere resultat i forlenging av det som vart presentert på figur 37. Forskjellen her er at berekningsnett brukt for denne samanlikninga er 100_20 og ikkje 10_2.

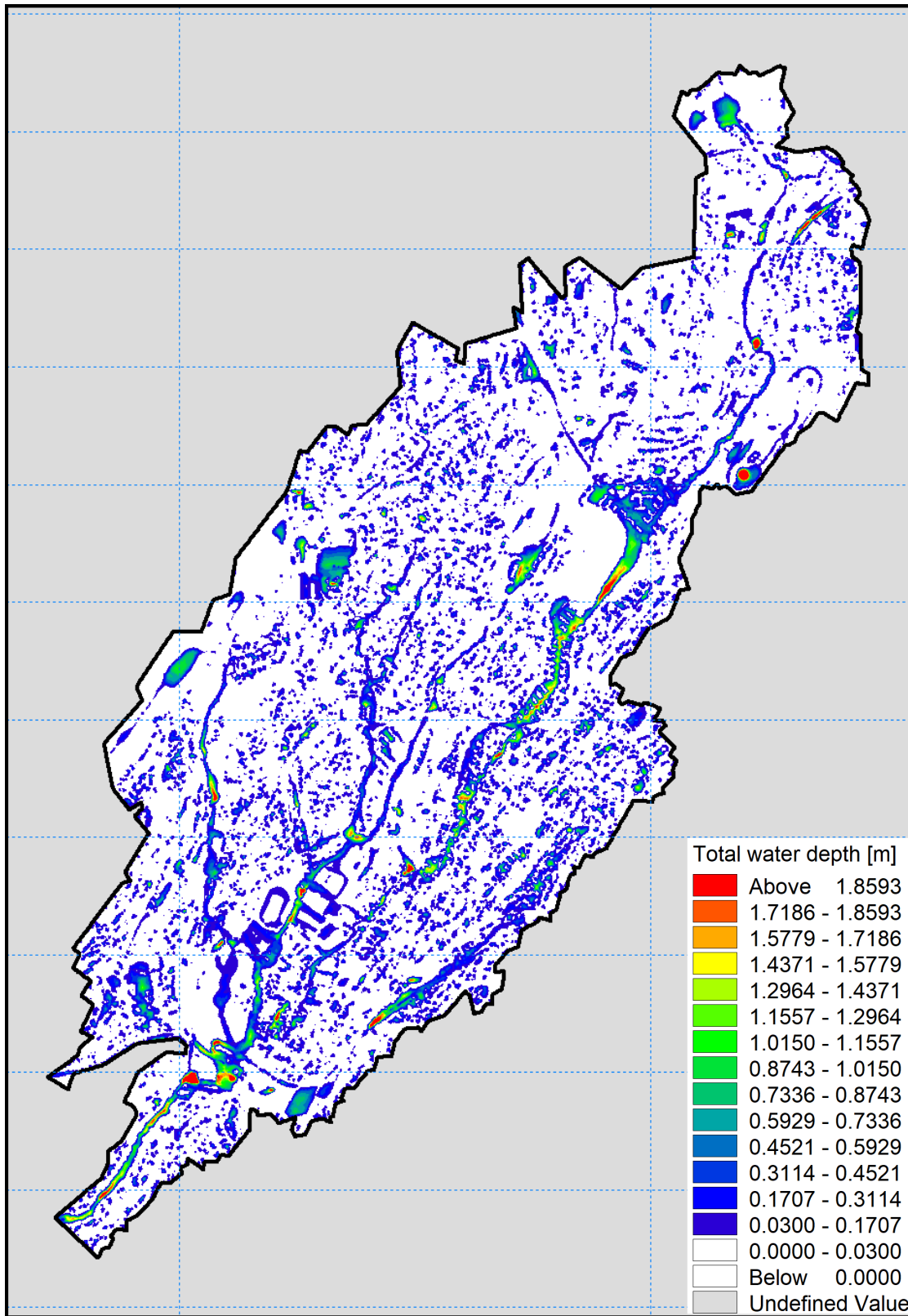


Figur 71: Samanlikning av flaumutbreiing mellom berekningsnett på 100x100m diffusiv bølge (blå gjennomskinleg farge) og berekningsnett 100_20 heile grunt vatn likningar (raud farge).

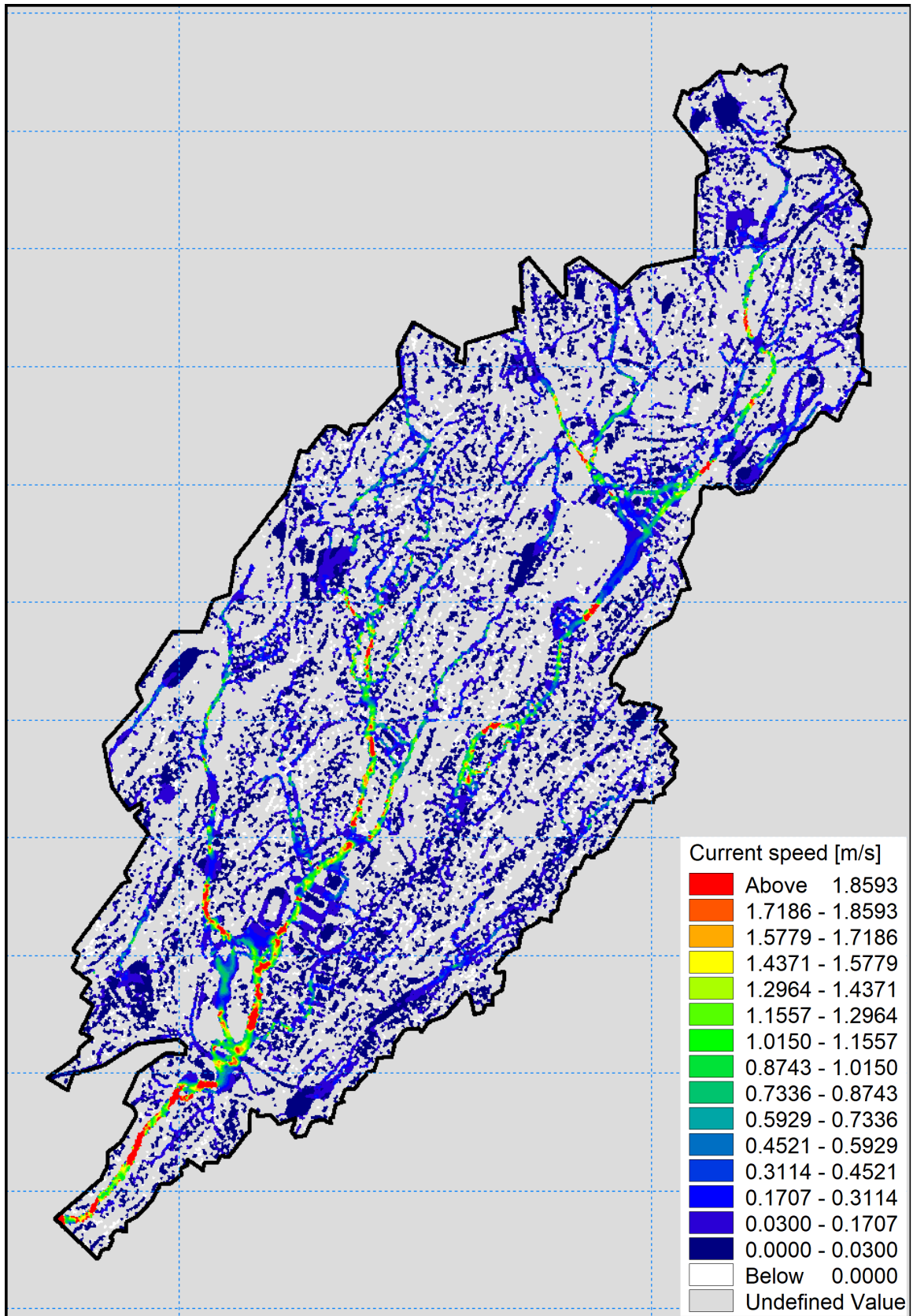
Figur 71 er danna i ein forlenging av figur 38. Forhald beskrive for figur 38 vil også gjelde for denne figuren.



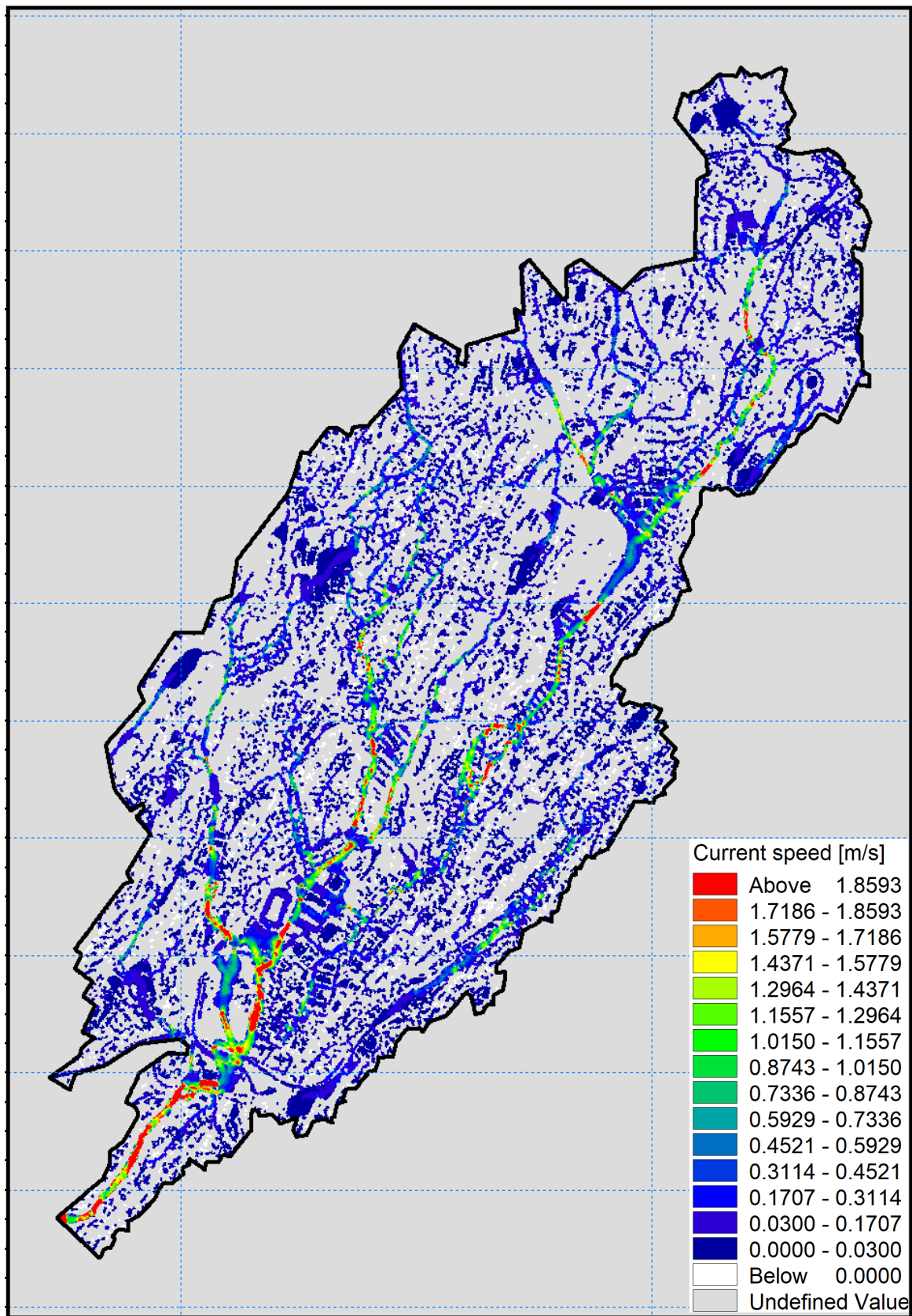
Figur 72: Vassdjup for berekningsnett med maks triangelareal på 30m².



Figur 73: Vassdjup for berekningsnett med maks triangelareal på 30m² på feltet generelt og 15m² for detaljområde.



Figur 74: Hastighet for berekningsnett med maks triangelareal på 30m².



Figur 75: Hastighet for beregningsnett med maks triangelareal på 30m² på feltet generelt og 15m² for detaljområde



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway