



Dynamic2D

Kort Beskrivelse



Juni 2023



Contents

1	Indledning	3
2	Løsningsmetode – Overfladestrømninger	4
3	Løsningsmetoder – Afløbssystemet.....	7
3.1	Serviceniveau-modellen.....	7
3.2	Dynamisk-rørmodel	9
4	Drivende kræfter.....	12
4.1	Startbetingelser.....	12
4.2	Randbetingelser	12
4.3	Påvirkninger i modelområdet	12
5	Anvendelser	14
5.1	Baggrund	14
5.2	Serviceniveaubekendtgørelsen - 2276.....	16
5.3	Anvendelsesfokus: Risikokortlægning for skybrud	17
5.4	Anvendelsesfokus: Analyse af vandparkering	20
5.5	Anvendelsesfokus: Risikokortlægning for oversvømmelser fra hav.....	21
5.6	Anvendelsesfokus: Hindcast af ekstremhændelser	22
6	Referencer.....	24



Quality assurance

<i>Client</i> CBMC Group ApS	<i>Client's representative</i> Jørgen Bo Nielsen
---------------------------------	---

<i>Project</i> Dynamic2D – Kort Beskrivelse	<i>Project reference</i>
--	--------------------------

<i>Author(s)</i> Erland B. Rasmussen	<i>Date</i> Juni 2023
	<i>Approved by</i> Jørgen Bo Nielsen

<i>Revision</i>	<i>Description</i>	<i>By</i>	<i>QA</i>	<i>Approval</i>	<i>Date</i>
	Draft version				
	Final version				



1 Indledning

Dynamic2D – forkortet D2D - er et moderne modelsystem til dynamisk simulering af:

- To-dimensionale overfladestrømninger og vandstande

fuldt integreret med

- Strømninger og volumener i et eventuelt afløbssystem i modelområdet

2D overfladestrømningerne beregnes på basis af numerisk løsning af Saint Venant ligningerne. Løsningsmetoden er ikke-iterativ og bygger på et finit differensskema.

Til modellering af kloakerede områder inkluderer Dynamic2D to modelbeskrivelser for afløbssystemet. Den ene (Serviceniveau-modellen) er velegnet til screeningsformål, mens den anden (Dynamisk rørmodel) egner sig mere detaljerede studier – f.eks. til at skabe oversvømmelseskort, som kan danne grundlag for samfundsøkonomiske beregninger af klimatilpasningsløsninger.

Selve de økonomiske beregninger kan f.eks. udføres ved hjælp af et søsterværktøj til kvantificerede risikoanalyser: UCAT.

Dynamic2D er udviklet af CBMC Group. Det primære anvendelsesområde er oversvømmelsesmodellering f.eks. til brug i planlægning af klimatilpasning. D2D kan simulere oversvømmelser fra hav, vandløb eller skybrud.

Denne "Kort Beskrivelse" inkluderer afsnit om de anvendte løsningsmetoder såvel som eksempler på D2D's anvendelsesmuligheder.



2 Løsningsmetode – Overfladestrømninger

2.1 Saint Venants ligninger

De styrende ligninger, kaldet Saint Venant ligningerne, udtrykker grundlæggende, at masse og bevægelsesmængde bevares over tid. Dette udtrykkes i to dimensioner. Ligningerne forudsætter (relativt) begrænset vanddybde og lille til moderat hældning af bunden. Med disse forudsætninger kan ligningerne integreres over vanddybden og ser således ud:

Massebevarelse:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = S_{ss} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Bevarelse af bevægelsesmængde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial p^2}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial qp}{\partial y} - 2\omega \sin \varphi \ q \\ = -gh \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v^T \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} kh \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v^T \frac{\partial p}{\partial y} \right\} - C_b p |U| \\ + \frac{\rho_{air}}{\rho} C_D w_x |W| + p S_{ss} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

og

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial pq}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial q^2}{\partial y} + 2\omega \sin \varphi \ p \\ = -gh \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v^T \frac{\partial q}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v^T \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{2}{3} kh \right\} - C_b q |U| \\ + \frac{\rho_{air}}{\rho} C_D w_y |W| + q S_{ss} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

hvor:

h er vanddybden

p er den dybdeintegrerede flux i x-retningen,

q er den dybdeintegrerede flux i y-retningen,

S_{ss} er en potentiel kilde eller dræn angivelse

C_b og C_D er modstandskoefficienter for bundfriktion henholdsvis vindfriktion,

v^T er hvirvelviskositeten, og k er den kinetiske energi,

ρ_{air} er luftens massefylde.

$|U|$ og $|W|$ hastigheden af den dybdeintegrerede flux henholdsvis vind, w_i er vindhastighedens komponent i x_i -retningen

φ er breddegraden og ω jordens rotationshastighed.

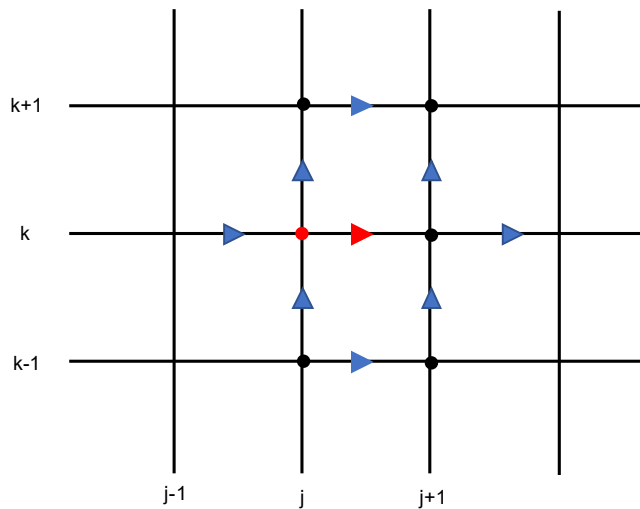
Bundfriktionsudtrykkene ($C_b p |U|$ og $C_b q |U|$) udtrykkes enten i form af en Manning eller Chèzy formulering.



2.2 Diskretisering i rum og tid

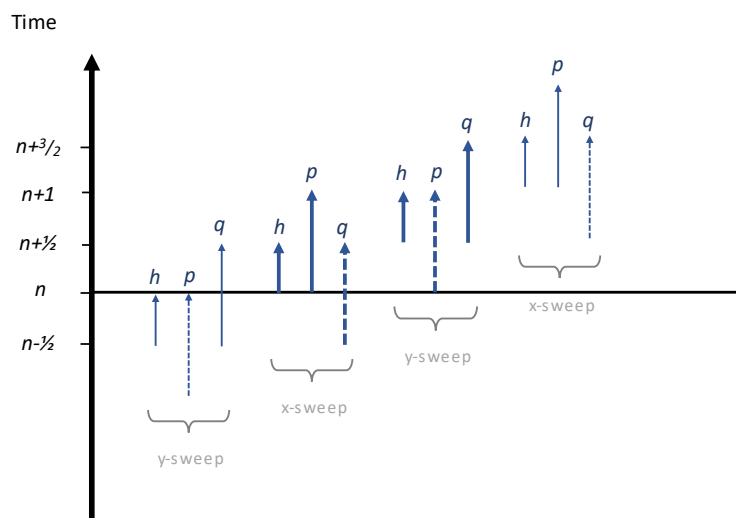
De styrende ligninger er formuleret i kontinuert rum og tid. For at løse ligningerne numerisk skal ligningerne omformuleres i et diskret beregningsnet med to stedsdimensioner og en tidsdimension.

Den rumlige diskretisering er vist i Figur 2-1. Alle skalar-variable er defineret i knudepunkterne, mens vektor-variable er defineret imellem knuderne. Vanddybden, $h_{j,k}$, og overflade-elevationen, $S_{j,k}$, er vist som den røde plet i Figur 2-1, mens den dybdeintegrerede strømning er vist som den røde spids af pilen i figuren.



Figur 2-1 Rumlig diskretisering af beregningsvariable i Dynamic2D

Ved at anvende en tidlig diskretisering (kendt som "time-staggering") af de variable, som vist i Figur 2-2 og kombinere denne med en såkaldt "side-feeding" teknik, bliver det muligt at anvende en ikke-iterativ løsningsmetode.



Figur 2-2 Time staggering af variable i Dynamic2D



2.3 Numerisk løsningsmetode

Som nævnt ovenfor benyttes en finit differens teknik til løsning af ligningerne. Dynamic2D løser ligningerne i et uniformt, kvadratisk net, hvor afstanden mellem knudepunkterne kan variere fra model til model, men ikke i én og samme model.

For en detaljeret udledning af denne metode, som den er implementeret i Dynamic2D, henvises til REF. /1/.



3 Løsningsmetoder – Afløbssystemet

I Dynamic2D kan brugeren vælge mellem to forskellige modeller for afløbssystemet:

Serviceniveau-modellen:

Denne model er velegnet til **screeningsstudier** og herunder til beregning af oversvømmelseskort til brug i risikoanalyser i relation til klimatilpasning.

Dynamisk rørmodel:

Denne model er egnet til de mere **detaljerede beregninger** f.eks. til analyse af løsningskoncepter for klimatilpasning og herunder til beregning af oversvømmelseskort til brug i **samfundsøkonomiske analyser**.

3.1 Serviceniveau-modellen

I denne model antages, at afløbssystemets maksimale kapacitet til at transportere vand væk er konstant, og at denne kapacitet svarer til et uniformt serviceniveau for hvert opland, der modelleres.

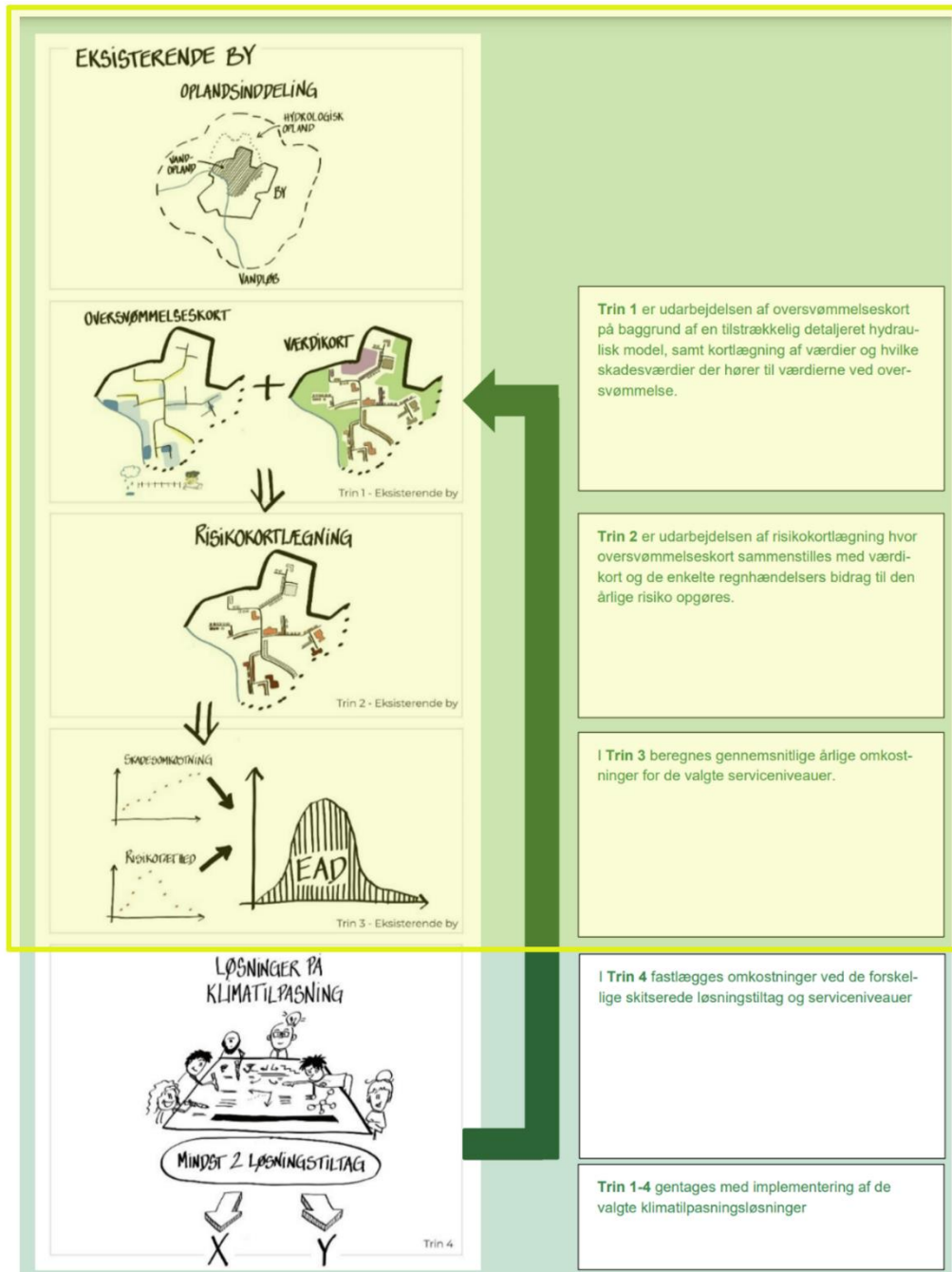
Kapaciteten antages at gælde for det befæstede areal (inkl. bygningstage). Serviceniveauet omregnes til en maksimal fjernelseskapacitet, som på hvert tidstrin af modelleringen fjerner:

- Tagvandet
- Vand fra de befæstede områder via infiltration til afløbssystemet i disse områder

Vand infiltreres fra alle oversvømmede dele af de befæstede områder, hvilket skal tilnærme bortstrømning via vejriste.

Modellen kører synkront med overflademodellen – med samme tidsskridt, som denne.

Serviceniveau-modellen er velegnet til beregning af oversvømmelseskort til brug ved beregning af risikokort i forbindelse med planlægning af klimatilpasning. Anvendelsesområdet modsvarer de highlightede dele af nedenstående figur, som stammer fra Afsnit 4.3 i ”Vejledning om fastsættelse af serviceniveau for tag- og overfladevand efter den samfundsøkonomiske metode i serviceniveau-bekendtgørelsen Bek. nr. 2276 af 29/12/20”.



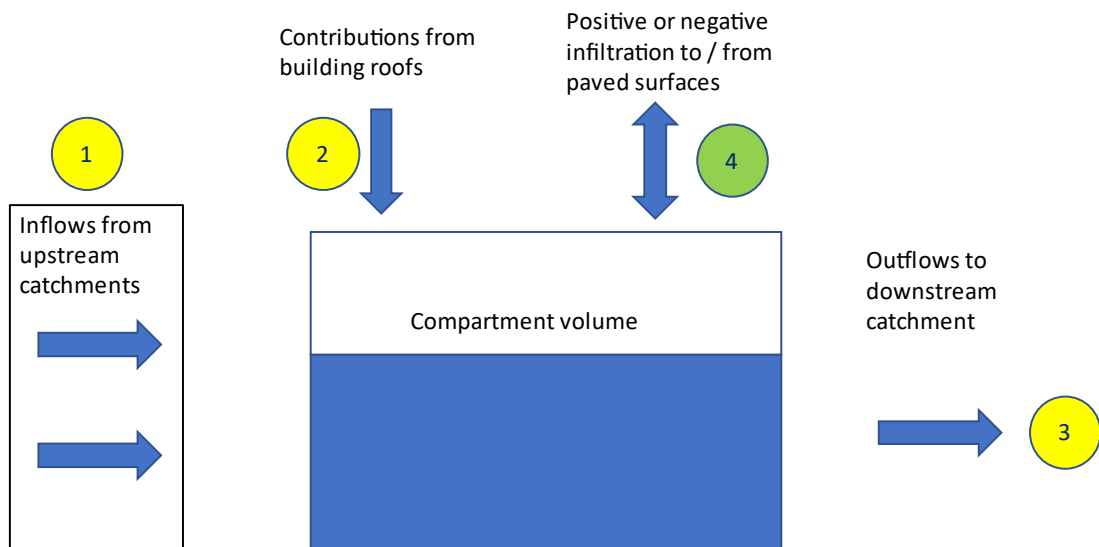
Figur 3.1 Anvendelsesområde for Serviceniveau-modellen



3.2 Dynamisk-rørmodel

I denne beskrives afløbssystemet som en serie af rør med kendte dimensioner og kendte tilknyttede oplande, som tager imod nedbøren og sender den videre til rørsystemet.

Serien af rør kan repræsentere enkeltrør. Alternativt kan rørsystemet simplificeres, så et antal rør samles i et større rør-basin med samme volumen og samme hydrauliske ledningsevne, som den gruppe af enkeltrør, der er samlet. Et skitseret rør-basin med ind- og udstrømmende vandkomponenter er vist i Figur 3.2.



Figur 3.2 Vandbalancen i et rør(-basin)

Modellen løser to ligninger:

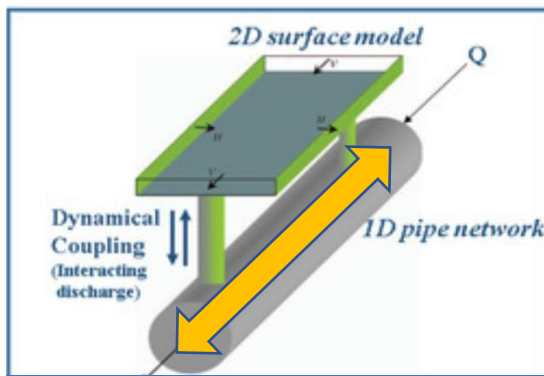
- Kontinuitetsligningen, som siger at summen af indstrømmende vand, udstrømmende vand og ændringen i vandvolumen i røret er nul.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\text{Volume}_{\text{compartment}}) = Q_{\text{inflows}} - Q_{\text{outflows}} + Q_{\text{roofs}} + Q_{\text{surface}}$$

- Strømningsligningen, som beregner udstrømmende vand på basis af de hydrauliske egenskaber af udløbsrøret og trykgradienten fra indløb i til udløb fra dette rør.

$$\Delta H = K Q^2$$

Hvor ΔH er trykgradienten, som afhænger af fyldningsgraden af opstrøms og nedstrøms rør. Trykgradienten for et givet rør kan skifte fortegn, hvilket gør det muligt at **simulere strømninger i begge retninger**. K er en friktionskoefficient.

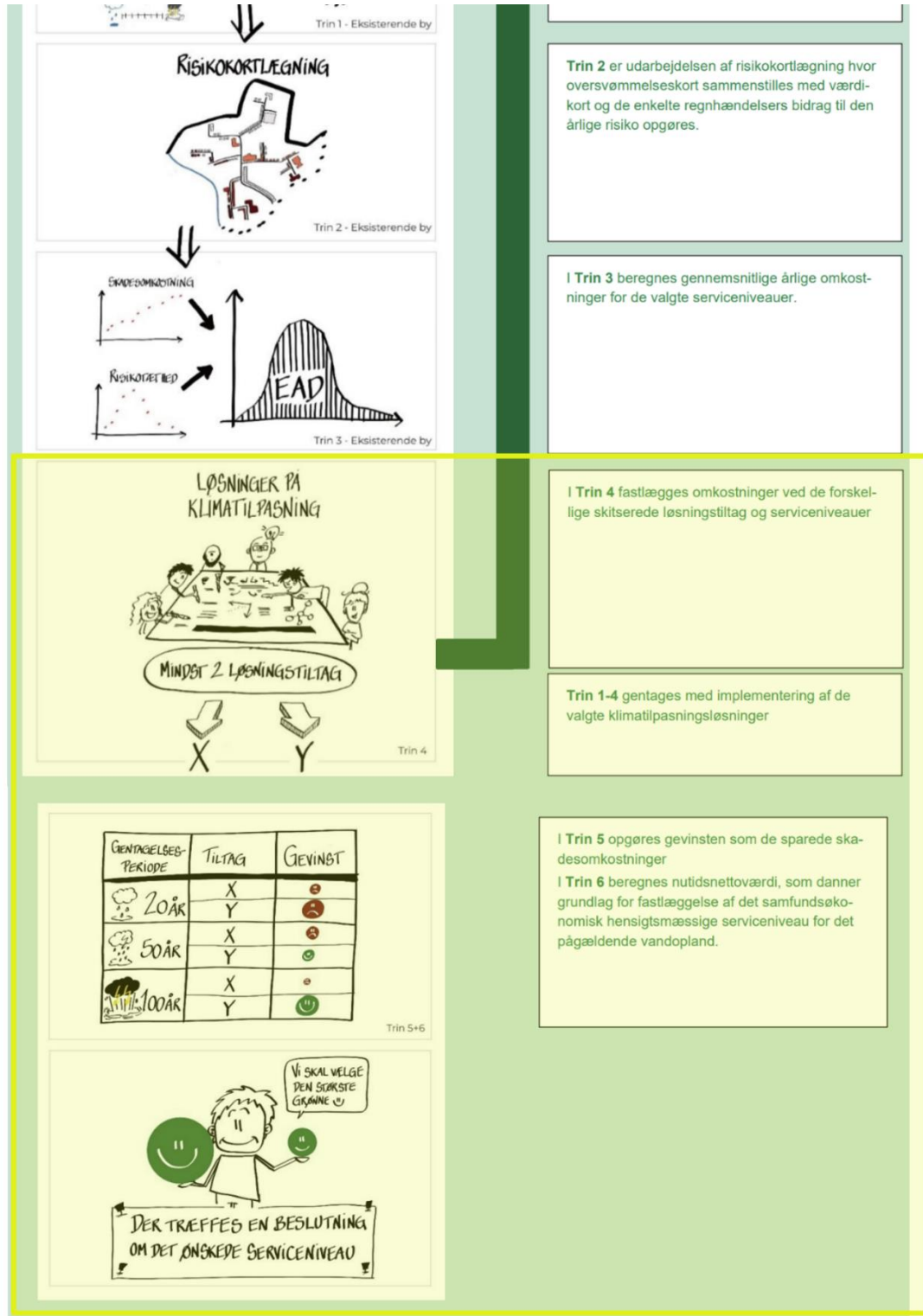


Figur 3.3 Dynamisk rørmodel tillader tilbagestuvning og retnings skifte af rørstrømningerne.

Den dynamiske rørmodel udveksler vand med overflademodellen på hvert tidsskridt. Det sker i form af at

- Tagvandet føres direkte til rørmodellen
- Vand fra de befæstede områder strømmer via infiltration til afløbssystemet, såfremt der er plads i rørsystemet
- Vand fra rørsystemet strømmer op på overfladen, såfremt der er for lidt plads i rørsystemet. Vandudvekslingen sker på de i forvejen våde dele af det befæstede areal tilhørende det specifikke rør/rør-basin. Herfra indgår vandet i overfladestrømningerne og kan således flytte sig på overfladen og strømme tilbage til rørsystemet et andet sted.

Både overflademodellen og rørmodellen er dynamiske, og de to modeller udveksler vand på hvert tidsskridt af simuleringerne. Dynamic2D med den dynamiske rørmodel opfylder derfor kravene til modellering i forbindelse med **serviceniveau-bekendtgørelsens** vejledning om brugen af koblede dynamiske modeller til de samfundsøkonomiske beregninger.



Figur 3.2 Anvendelsesråde for Dynamisk Rørmodel



4 Drivende kræfter

Dynamic2D igangsættes med et sæt **startbetingelser**, hvorefter simuleringen styres af et sæt **påvirkninger**, som udtrykker de tidsligt varierende begivenheder, som påvirker strømninger og vandstande i modelområdet. Påvirkningerne kan igen opdeles i **randbetingelser** og **påvirkninger i modelområdet**.

4.1 Startbetingelser

Startbetingelserne beskriver værdierne af de variable (strømninger og vandstande) i hele modelområdet ved simuleringens starttidspunkt.

Startbetingelserne for en simulering af oversvømmelser fra nedbør vil typisk bestå i, at vandstand og strømninger er nul ved simuleringens start.

Startbetingelserne for en simulering af strømninger i havet (eller andre åbne vandområder) vil typisk bestå af en éns vandstand i vandområdet og strømninger lig nul.

Dynamic2D har mulighed for at operere med såkaldt **hotstart**. Det vil sige, at startbetingelserne indlæses i form af en fil, som er gemt fra en tidligere simulering, således at den nye simulering starter med varierende vandstande og strømninger.

4.2 Randbetingelser

Randbetingelserne foreskriver værdier af de variable (strømninger og vandstande) langs modellens afgrænsning mod resten af verden – den eller de åbne, ydre rande. Simuleringen af, hvad der sker inde i modelområdet, skal med andre ord til ethvert tidspunkt respektere disse foreskrevne værdier.

Randbetingelserne langs en åben rand kan foreskrives som én af følgende:

- Vandstand (h)
- Flux (Q) (vandstrømning på tværs af randen)
- Q/h relation (kurve, som foreskriver Q som funktion af h)

Værdierne af disse variable kan variere i tid og de kan også variere langs den åbne rand.

4.3 Påvirkninger i modelområdet

En række fysiske fænomener er med til at påvirke vandstande og strømninger i et givet område. Dynamic2D kan tage højde for følgende påvirkninger:

- Bundfriktion (stedsvarierende)
- Vindfriktion på overfladen (steds- og tidsvarierende)
- Nedbør (regn) (steds- og tidsvarierende)
- Fordampning (steds- og tidsvarierende)
- Nedsivning (steds- og tidsvarierende)
- Kilder og dræn (tidsvarierende)
- Strukturer (rektangulære og cirkulære underføringer, pumper, bevægelige stigborde (tidsvarierende), overløbsstrukturer, som f.eks. diger, ventiler (ensrettere af strømning), m.fl.



- Interaktion med afløbssystemet, som beskrevet i Afsnit 3.

Desuden kan Dynamic2D tage højde for, at områder skifter mellem at være tørre og våde.

Dynamic2D kan også inkludere enkeltrør eller grupper af rør som elementer integreret i den dynamiske simulering. Strømningen igennem røret afhænger af rørets egenskaber samt opstrøms og nedstrøms tryk.



5 Anvendelser

5.1 Baggrund

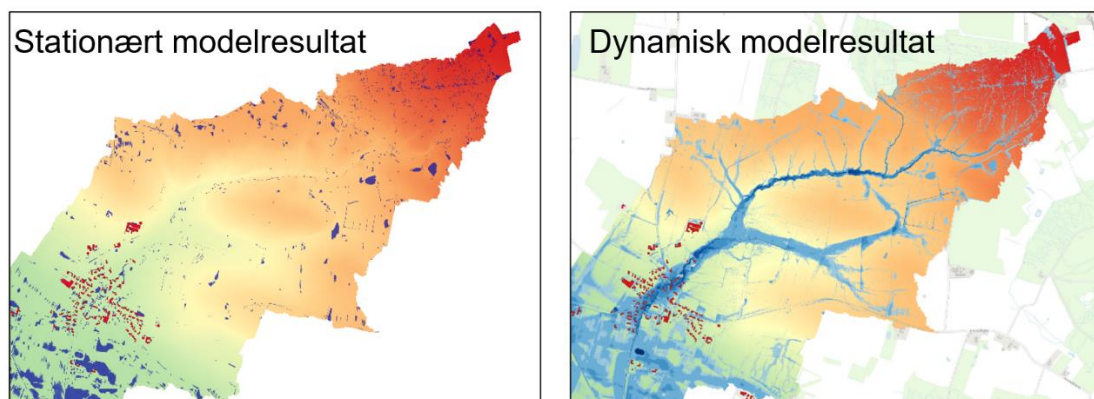
Dynamic2D er primært udviklet med henblik på modellering af oversvømmelser – og værktøjet er specifikt tilpasset danske forhold gennem at designe det til effektivt at udnytte offentligt tilgængelige data, så det er nemt og billigt at opsætte modeller for danske oplande.

Baggrunden for dette er, at der er et stadig stigende behov for simulering af oversvømmelser, i takt med at kommuner og forsyninger løbende skal opdatere og detaljere deres planer for klimatilpasning.

De første udgaver af kommunernes klimatilpasningsplaner har i vidt omfang benyttet simple screeningsværktøjer til at identificere områder, hvor risikoen for skader fra oversvømmelser kan forventes at stige, når skybrudshændelser bliver hyppigere og mere intense. Disse simple værktøjer inkluderer ikke dynamikken i vandets strømninger. I stedet finder de blot frem til de lavninger i området, som ikke har afløb, og som derfor fungerer som opsamlingssteder for vand i forbindelse med større nedbørshændelser.

Der er imidlertid en voksende forståelse for, at resultater fra de simple værktøjer er meget lidt egnede som udgangspunkt for risikoanalyser. Resultaterne er ganske enkelt helt forkerte i mange sammenhænge, fordi de ikke inkluderer det tidslige forløb af oversvømmelserne, men udelukkende viser, hvor vandet ligger, når hændelserne er slut.

Et godt eksempel på dette er vist i Figur 5-1 herunder.



Maksimal oversvømmelser i Fole, Haderslev Kommune ved 150 mm nedbør

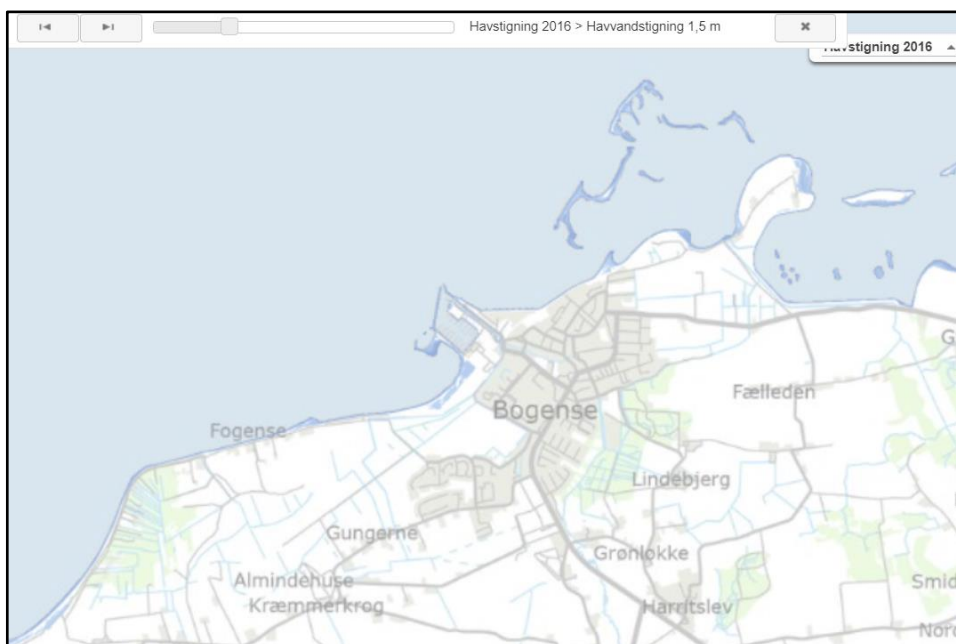
Figur 5-1 *Klassisk forskel mellem stationært og dynamisk modelresultat*

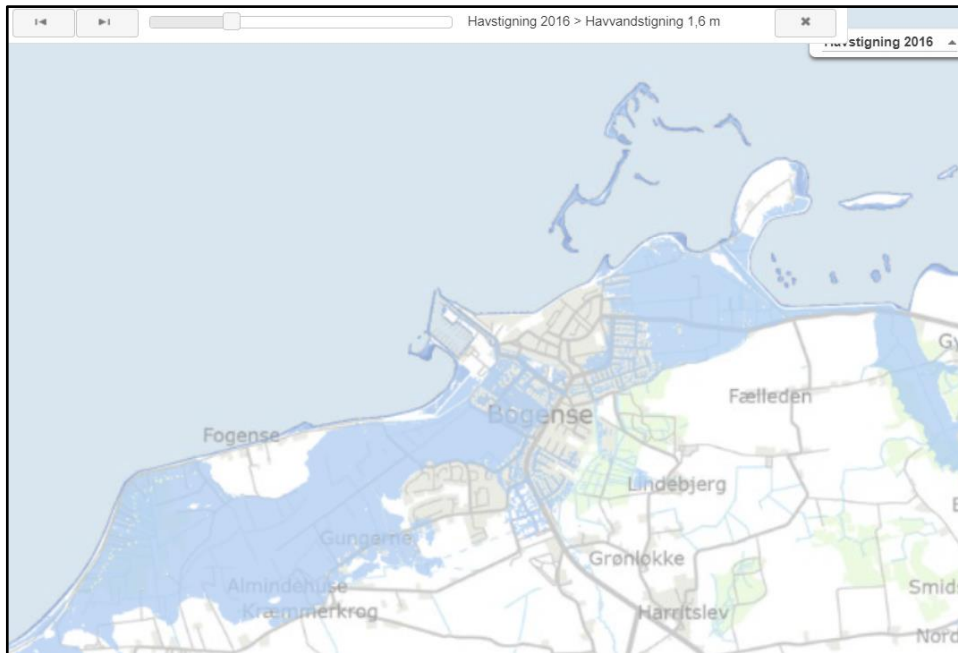
Årsagen til den voldsomme forskel på resultaterne i Figur 5-1 er, at der løber en lille bæk gennem landsbyen Fole. Denne bæk løber under nogle veje gennem relativt snævre underføringer. Da et voldsomt skybrud ramte Fole i juli 2021, var disse underføringer helt utilstrækkelige til at bortlede vandet i takt med at det strømmede til byen fra markerne mod nordøst. Resultatet var mange timer med oversvømmelser af bygninger og veje. Den stationære model er helt ligeglad med dimensionerne af vejunderføringerne og de tilbagestuvninger, som flaskehalsene medfører. Vandet kan jo komme væk (givet uendelig



tid), og derfor ser man ingen oversvømmelser i Fole i beregningerne med en stationær model.

Helt tilsvarende eksempler på fejl finder man for oversvømmelser fra havet. Figur 5-2 viser oversvømmelser fra hav for et område omkring Bogense på Nordfyn. De to kort viser henholdsvis oversvømmelser for en vandstand 1,5 m og 1,6 m over dagens normal beregnet med en stationær model. Såfremt man benytter denne til at beregne oversvømmelser fra en stormflod med 1,6 m maksimumvandstand, vil man nå frem til det nederste kort. Ved 1,5 m, finder man det øverste. Realiteten er, at vandet ved 1,6 m stigning lige netop finder en snæver passage fra havneområdet og ind i baglandet. Det vil kræve dage at fylde baglandet svarende til oversvømmelserne på kortet. En stationær model rammer med andre ord helt forkert i dette tilfælde, hvor oversvømmelsens forløb først og fremmest styres af, hvor meget vand, der kan nå at passere, mens vandstanden er forhøjet (jf. REF. /2./).





Figur 5-2 To oversvømmelseskort beregnet med en stationær model.

En alvorlig konsekvens af den manglende egnethed af simple stationære modeller er, at de specifikt **ikke er brugbare** til at forudsige, hvordan risikobilledet udvikler sig, når regnmængderne vokser i takt med klimaforandringerne. Det er de ikke, fordi voksende regnmængder ofte slet ikke vil føre til voksende oversvømmelser, hvis man bruger en stationær model. Når lavningerne i terrænet er fyldt til kanten, løber det "ekstra" vand bare bort og giver ikke anledning til yderligere oversvømmelser. Eftersom oversvømmelseskortene ikke ændrer sig væsentligt fra en vis nedbørsmængde og op, så ændrer risikobilledet sig heller ikke, og man vil alt andet lige konkludere fejlagtigt, at der ikke er et voksende behov for at klimatilpasse området, selv når nedbøren vokser.

Dynamiske modeller fortæller naturligvis en helt anden historie, fordi flaskehalse i området fører til større tilbagestuvninger og dermed større oversvømmelser og højere risiko for skader.

5.2 Serviceniveaubekendtgørelsen - 2276

Fordi svaghederne ved simple stationære modeller efterhånden er velkendte, stiller *Bekendtgørelse om fastsættelse af serviceniveau m.v. for håndtering af tag- og overfladevand (nr. 2276, 29. december 2020, jf. REF. /3/)* også krav om, at der skal anvendes dynamiske modeller som grundlag for de beregninger af samfundsøkonomiske konsekvenser, som forsyningerne skal gennemføre, hvis de skal retfærdiggøre at bidrage til klimatilpasning gennem en forhøjelse af serviceniveauet for et givet område.

Der stilles endda krav om, at de dynamiske modeller skal omfatte såvel overfladestrømninger (og oversvømmelser), som strømninger i afløbssystemet.

Med de hyppigst anvendte modelværktøjer (i Danmark) er denne type koblede, dynamiske beregninger særdeles krævende og kostbare. Kravet i bekendtgørelsen sætter derfor – i første omgang – barren højt for, hvornår forsyningerne overhovedet vil gå i gang med at undersøge fornuften i at deltage i større klimatilpasningsprojekter.



Derfor Dynamic2D!

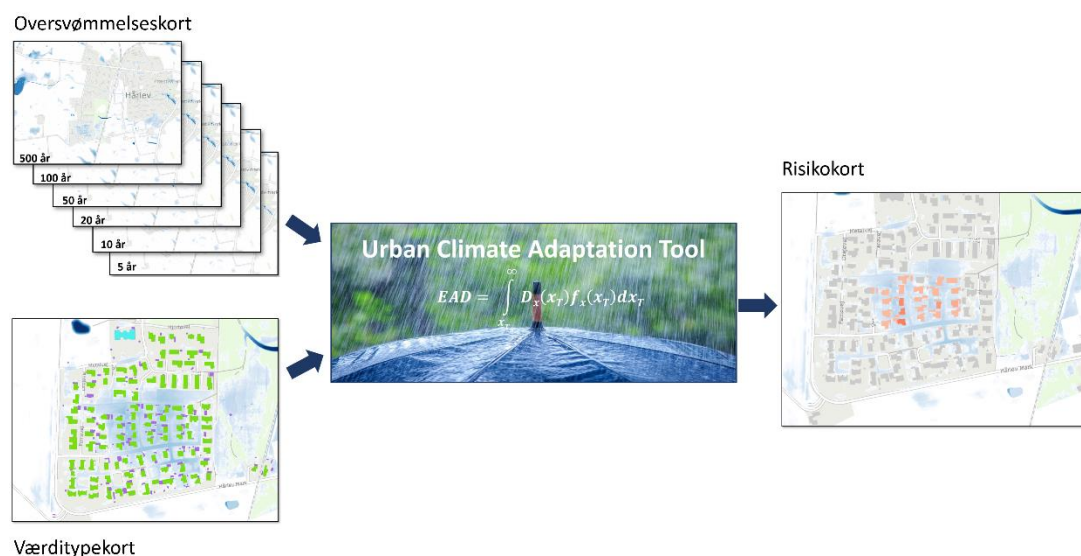
Dynamic2D sænker barren for, hvornår det kan lade sig gøre at regne på samfundsøkonomien ved klimatilpasningsprojekter. Det gør D2D fordi:

- Det er hurtigt og effektivt at opstille modeller med et fintmasket, kvadratisk net på grundlag af offentligt tilgængelige data
- Man har også adgang til at indbygge data om vejunderføringer, dræningsrør m.v. i modellen via brug af offentlige data
- Dynamic2D bygger på kendte, robuste og velafprøvede beregningsmetoder, som desuden har vist sig særdeles effektive – også for modeller med høj opløsning
- Dynamic2D gør det muligt direkte at inkludere de rør fra afløbssystemet, som har væsentlig betydning for oversvømmelsesberegningerne – og dermed opfylde kravene i serviceniveaubekendtgørelsen i ét beregningsværktøj
- Alt dette tilsammen medvirker til, at det er blevet **en størrelsesorden billigere** at gennemføre dynamisk modellering – også for større oplande og også for et antal tilpasningsscenerier

5.3 Anvendelsesfokus: Risikokortlægning for skybrud

Blandt de vigtigste klimaudviklinger, som allerede har ramt os, er den større hyppighed og intensitet af skybrud. Skybrud rammer typisk relativt lokalt, og det er en kortvarig begivenhed – fra minutter op til en time eller to.

Risikokortlægning – forstået som beregning af kort over forventede årlige skader – for skybrud forudsætter beregning af oversvømmelseskort svarende til nedbørshændelser med et antal forskellige gentagelsesperioder. Risikoen (kvantificeret i kr./m²/år) kan beregnes ud fra disse kort sammen med viden om (eller estimerer for), hvor store skader en given størrelse af oversvømmelse vil medføre for forskellige typer af værdier i området. Figur 5-3 viser princippet i risikoberegningerne.



Figur 5-3 Beregning af risikokort

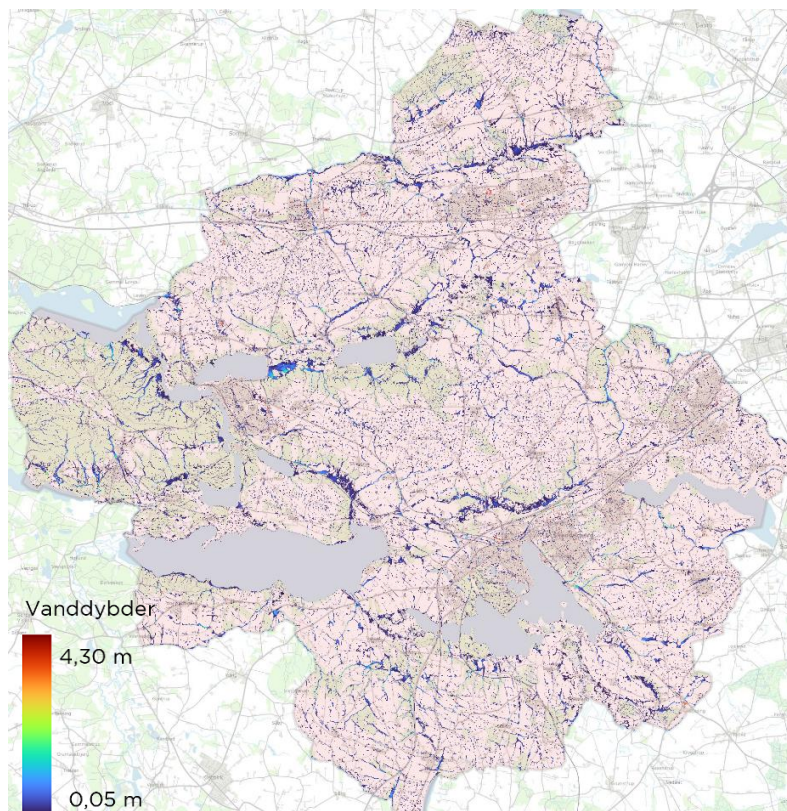


For at beregningen af risikokort skal blive nøjagtig, kræves det at man har adgang til et rimeligt antal oversvømmelseskort, som dækker bredt fra hyppige oversvømmelser til meget sjældne oversvømmelser. Derfor er det også af væsentlig betydning, at simuleringerne kan gennemføres hurtigt, effektivt og uden for store omkostninger.

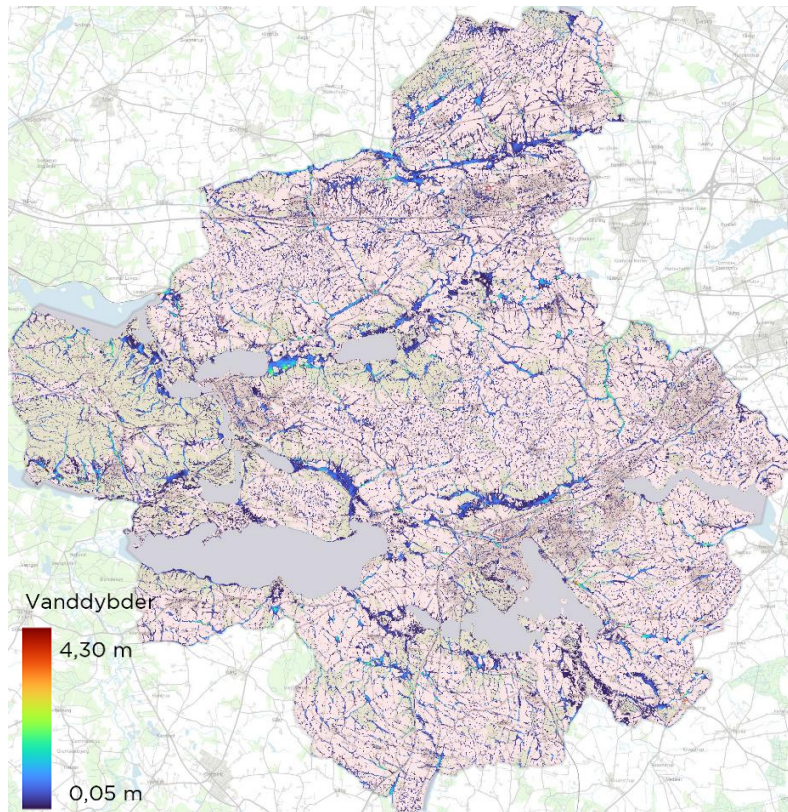
Samme metode kan naturligvis benyttes til at beregne reviderede risikokort for et antal mulige klimatilpasnings-scenarier. Ved at indbygge tilpasningerne i modellen kan man beregne nye oversvømmelseskort og derefter nye risikokort. Derved kan man få et estimat for, hvor meget man sparer årligt i forventede skader ved det planlagte indgreb.

Igen her er det naturligvis vigtigt, at den dynamiske modellering ikke tager for lang tid og/eller er for kostbar.

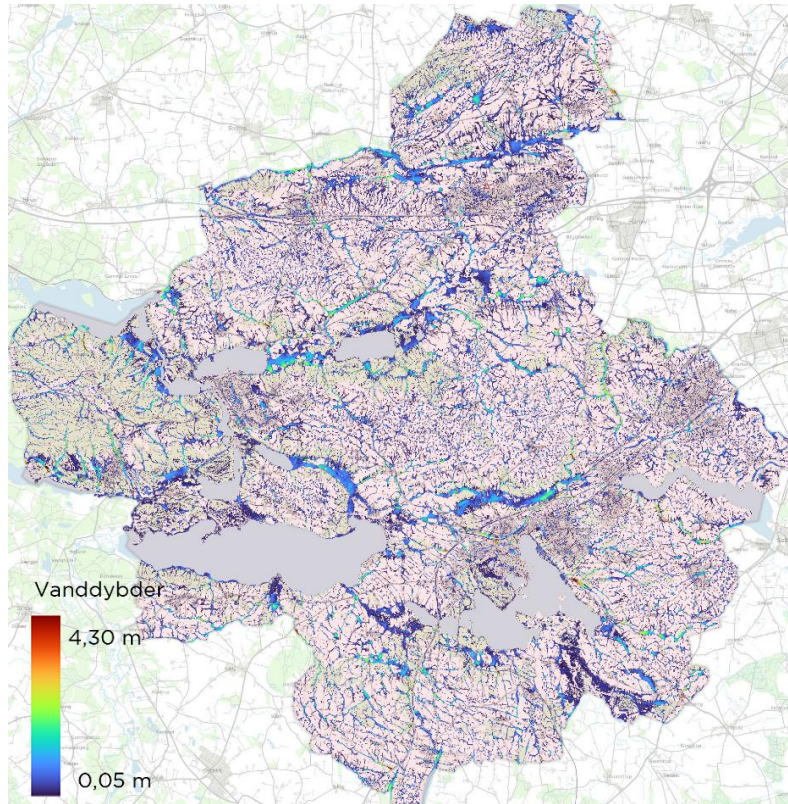
Dynamic2D har været anvendt til beregning af oversvømmelseskort til klimatilpasning i en række kommuner i Danmark. Figur 5-4 – Figur 5-6 viser eksempler på oversvømmelseskort for hele Skanderborg Kommune med en opløsning på 1,6 m. I alt blev 9 oversvømmelseskort produceret.



Figur 5-4 *Maksimal vanddybder for en 20mm netto-regnhændelse i Skanderborg Kommune. Vanddybder mindre end 5cm er ignoreret.*



Figur 5-5 *Maksimal vanddybde for en 40mm netto-regnhændelse i Skanderborg Kommune. Vanddybde mindre end 5cm er ignoreret.*



Figur 5-6 *Maksimal vanddybde for en 70mm netto-regnhændelse i Skanderborg Kommune. Vanddybde mindre end 5cm er ignoreret.*



5.4 Anvendelsesfokus: Analyse af vandparkering

Én af de løsningsmuligheder, som tages i brug for at forhindre oversvømmelser af bebyggede områder i forbindelse med ekstremnedbør, er vandparkering. Vandparkering er det populære navn for, at man bevidst forsinker afstrømningen fra oplandet opstrøms for et byområde for at mindske belastningen i selve byen og dermed undgå eller mindske risikoen for skader. Man styrer, hvor oversvømmelserne skal ske.

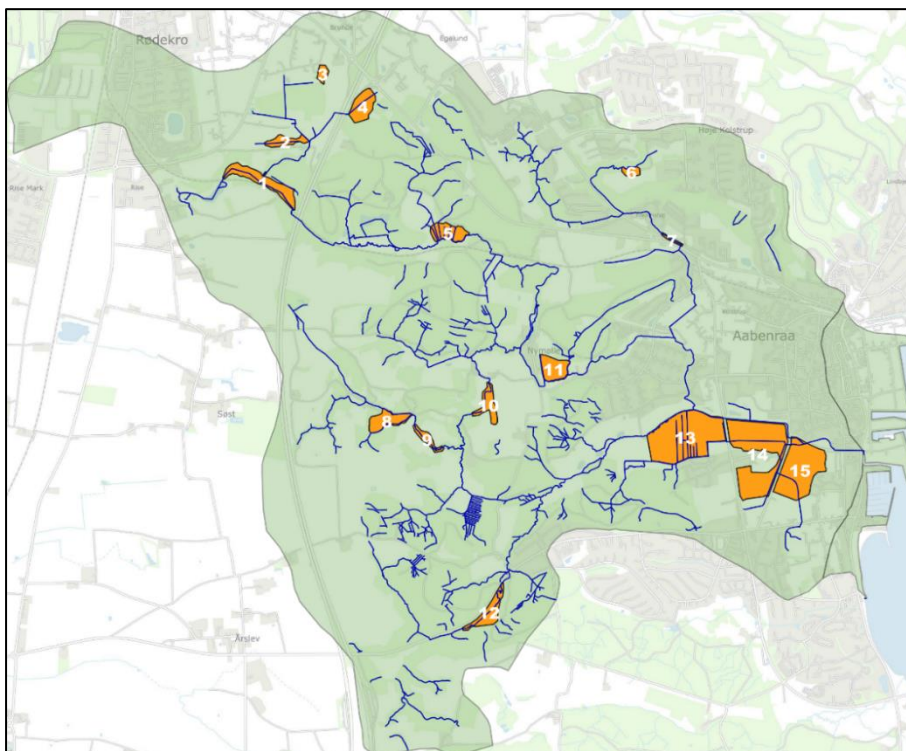
Vandparkering gennemføres i praksis ved at regulere kapaciteten i vandløbet, hvorved vand stuver op og breder sig ud over vandløbets naturlige bredder. Det kan så understøttes f.eks. gennem justeringer af terrænforhold, så vandet holder sig til de ønskede områder.

Ved analyse af vandparkeringsmuligheder er det tidlige forløb af afstrømningen af afgørende betydning. Dels er det forsinkelsen af afstrømningen, der "redder" byområdet, og dels er man også nødt til at sikre, at vandet ikke stuver så meget op, at der kommer skader i forbindelse med "parkeringspladserne". Samtidig er det vigtigt at forstå samspillet mellem flere forskellige vandparkeringsområder, så man får optimal effekt af alle indgrebene.

Dynamisk modellering er derfor nødvendig, hvis man vil analysere forskellige mulige scenarier.

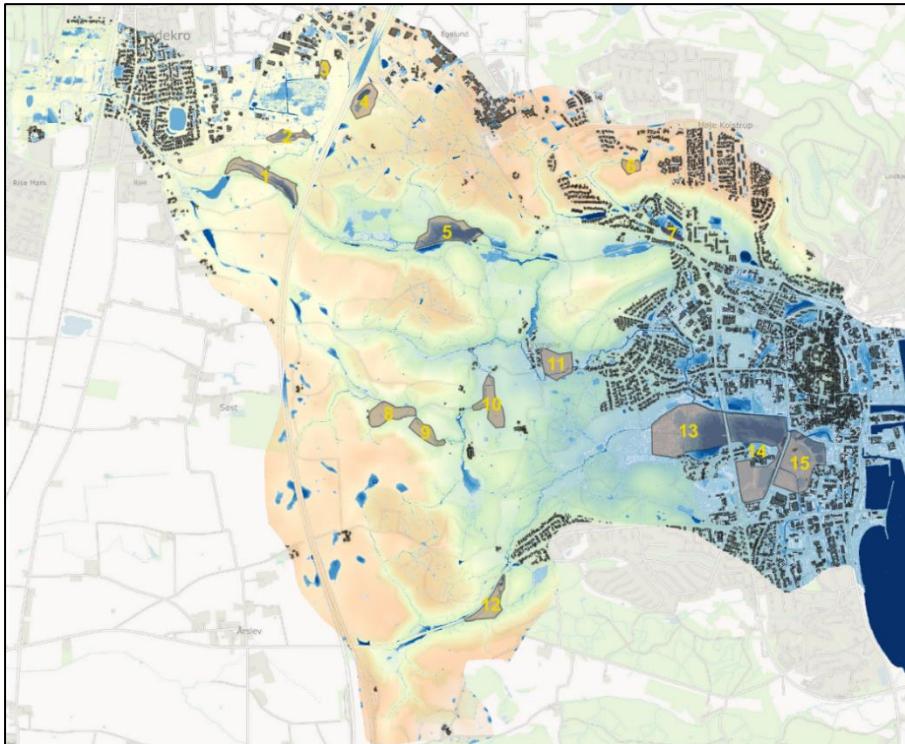
Dynamic2D har været anvendt til at analysere potentialet for vandparkering i Mølleå-oplandet i Aabenraa Kommune. Analysen inkluderede bl.a. en vurdering af kapaciteten for vandparkering i 15 områder udpeget af kommunen. Analysen inkluderede også dele af dræningsnetværket i de opstrøms dele af oplandet – og herunder mulighederne for at fjerne flaskehalse for at afhjælpe tilbagestuvning i rørene med opstrøms oversvømmelser til følge.

Figur 5-7 viser oplandet med de undersøgte vandparkeringsområder, mens Figur 5-8 viser et eksempel på resultater fra en D2D simulering af en 100 års nedbørshændelse.





Figur 5-7 Mulige områder for vandparkering i oplandet til Mølleåen, Aabenraa



Figur 5-8 Maksimale vanddybder for et scenarie ved en 100-års regn

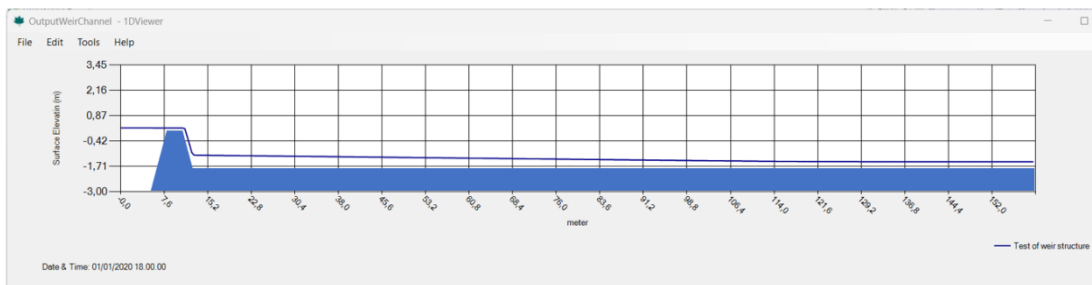
5.5 Anvendelsesfokus: Risikokortlægning for oversvømmelser fra hav

Som beskrevet i afsnit 5.1, kan man ikke beskrive konsekvenserne af oversvømmelser fra havet uden brug af dynamiske modeller. Sådanne glasplademodeller, der kun tager hensyn til, om der er en mulig udbredelsesvej for vandet, er stort set meningsløse. Det er de, fordi vandstanden altid varierer med tidevand, vejr og vind, så varighed og dermed er dynamikken altid vigtig for at forstå udbredelsen af en oversvømmelse.

Særligt vigtig er varighed og dynamik, når der er tale om oversvømmelser, hvor vandet strømmer over en digekrone (eller lignende) på vej ind til et sårbart bagland. Den tid, som vandstanden overstiger digekronekoten er altid begrænset, og mængden af indstrømmende vand er derfor også begrænset. En simpel glasplademodel vil vise en katastrofal oversvømmelse, hvor sandheden meget vel kan være helt anderledes begrænset.

Dynamic2D er et effektivt værktøj til beregning af oversvømmelser fra hav – ikke mindst fordi baglandet let kan modelleres i høj opløsning, så man får et detaljeret indblik i, hvilke områder, der er i særlig risiko. Denne risiko kan så i øvrigt kvantificeres som forventede årlige skader efter samme metoder som for skybrud.

Dynamic2D er blevet testet specifikt med henblik på at verificere, at strømninger over en digekrone modelleres korrekt – dvs at de rigtige vandmængder passerer digekronen for et givet niveau af vandspejlet på ydersiden af diget. Figur 5-9 viser et eksempel på en sådan test.



Figur 5-9 Test af vandføring over digekrone

5.6 Anvendelsesfokus: Hindcast af ekstremhændelser

At hindcaste en hændelse betyder, at man forsøger at simulere hændelsen så godt som muligt i en model baseret på målte observationer. Hindcasts kan tjene flere formål, herunder:

- At validere modellen ved at sammenligne målte og simulerede data
- At forbedre forståelsen af hændelsen gennem at få adgang til data, som ikke er målt
- At få adgang til specifikke data, som der er konkret brug for, og som ikke er målt/kan måles direkte
- At få adgang til data for en serie af historiske ekstremhændelser med henblik på statistisk bearbejdning – f.eks. for at etablere et designgrundlag for en konstruktion

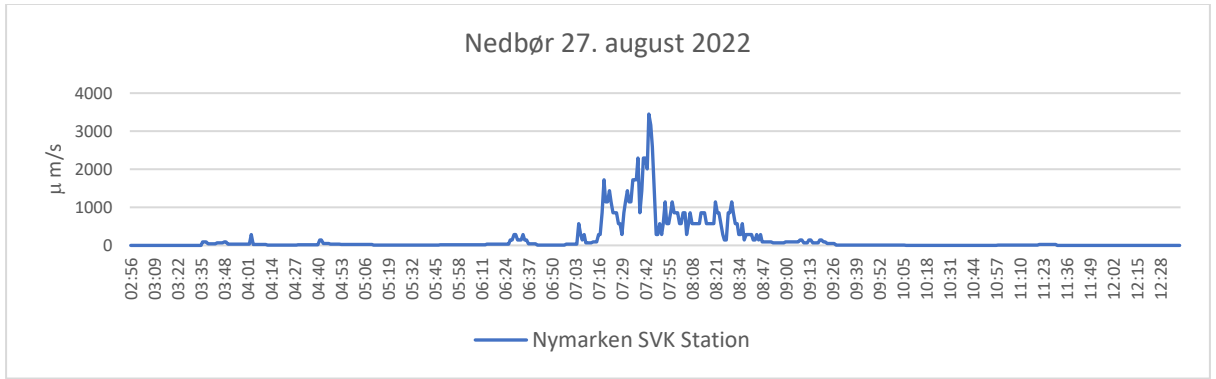
Dynamic2D har været anvendt til hindcast af kraftige skybrud i flere projekter.

Ét eksempel er fra Fole i Sønderjylland, hvor resultater er vist ovenfor (Figur 5-1). Målinger af vandstanden på gulvet i smedens garage (beliggende i den nordlige del af Fole by) viste fin overensstemmelse med modelresultaterne, maksimumdybde ca. 75 cm. Og den generelle udbredelse af oversvømmelserne var ligeledes i overensstemmelse med de rapporterede observationer.

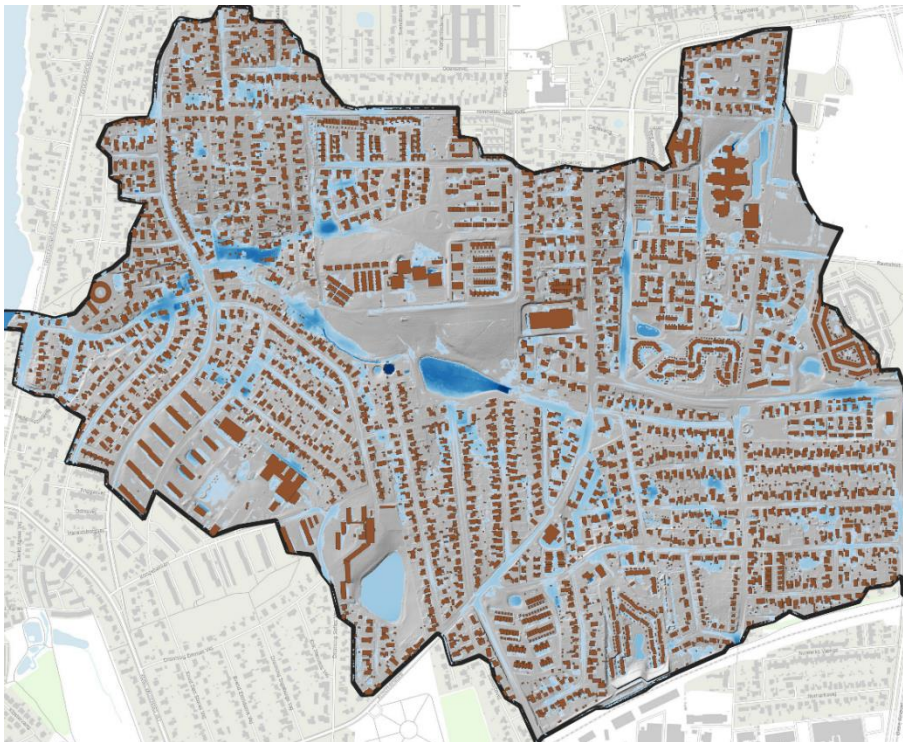
Et andet eksempel er fra Roskilde, hvor et skybrud med ca. 220 års gentagelsesperiode ramte dele af byen d. 27. august 2022. Det relevante hydrologiske opland på ca. 2,2 km² blev efterfølgende modelleret i meget høj opløsning (0,4 m). I modellen indgik også rør fra afløbssystemet, og modellen blev sat op med stedsligt varierende nedsivning svarende til befæstelsesgraderne lokalt. En tidsserie af nedbør fra en målestation i området blev brugt som input til simuleringen.

Resultaterne viste god overensstemmelse mellem områder med registrerede skader på ejendomme og de simulerede ekstremvandybder.

Figur 5-10 viser den målte tidsserie af nedbør – anvendt som input til hindcastet. Figur 5-11 viser de maksimale hindcastede vanddybder i oplandet.



Figur 5-10 Registreret nedbør for Nymarken SVK målestationen.



Figur 5-11 Maksimale vanddybder fra hindcast af skybrud i Roskilde 27. august 2022



6 Referencer

- REF. /1/ Dynamic2D, Scientific Documentation, CBMC Group ApS
- REF. /2/ Klimatilpasning.dk (se evt. [her](#))
- REF. /3/ Vejledning til "*Bekendtgørelse Nr. 2276: Bekendtgørelse om fastsættelse af serviceniveau m.v. for håndtering af tag- og overfladevand. Miljø- og Fødevareudvalget 2020-21. Bilag 311, Lovtidende A 2020*", 18. marts 2022 (se evt. [her](#))



CBMC Group

Birkebakken 80, DK-3460 Birkerød, Denmark

Telefon: +45 2211 1080

+45 4072 7672

Email: info@cbmcgroup.com

www.cbmcgroup.com

CVR: DK40285652

Copyright © CBMC Group. All Rights Reserved