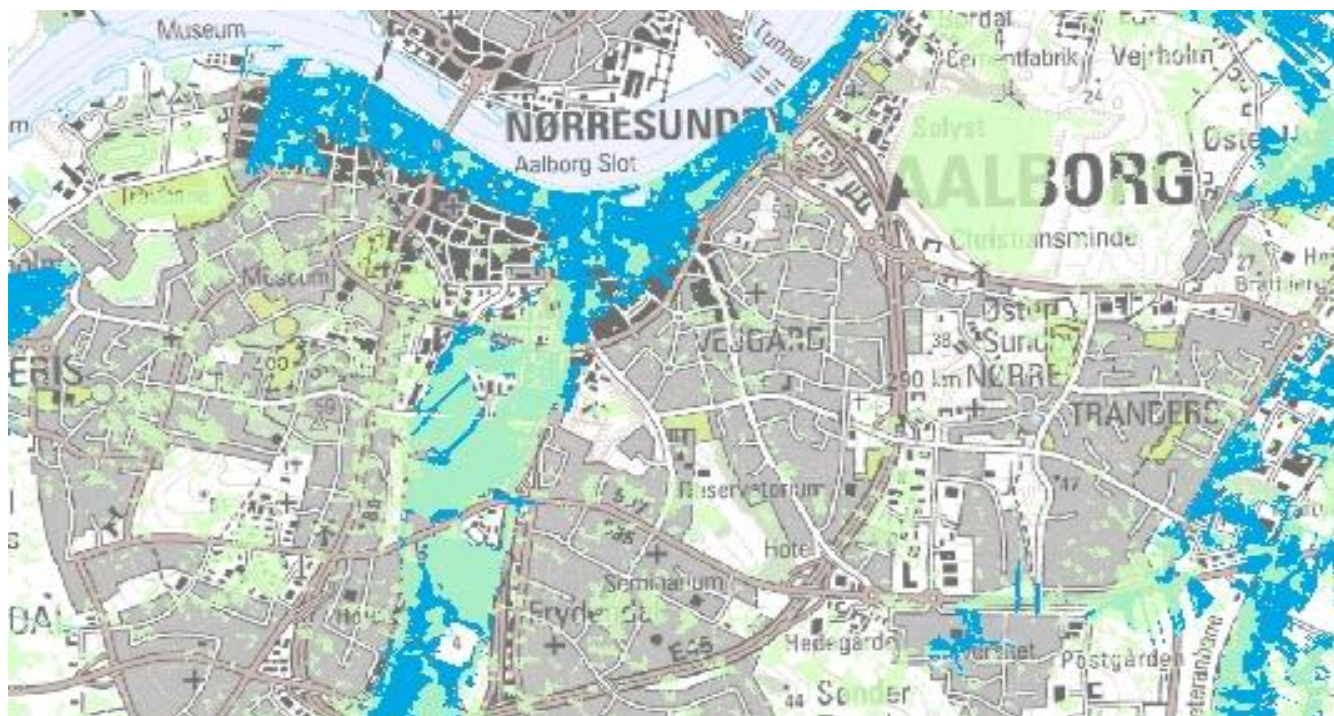


KORTLÆGNING AF OVERSVØMMELSESTRUEDE OMRÅDER I ARCGIS



Kandidatafhandling
10. Semester Integretiv Geografi
Afleveringsdato: 12.06.2012

Katrine Olsen



SUMMARY

In the light of an increase in floods caused by longer and heavier precipitation, the purpose of this Master's Thesis is to study potential methods to locate flood exposed areas with ArcGIS based on a digital terrain model.

The field of research has been narrowed down to the city of Aalborg, where a study of currently flood exposed areas has been conducted with the purpose of finding and mapping the exposed areas. The areas have been identified by means of an interview with head of Aquatic Environmental Department; Michael Eilertsen, from Aalborg Municipality as well as publications from news media.

Studying the historically causes of floods in the flood exposed areas has contributed to the choice of approach to the thesis' modeling of flood exposed areas. From the clarification that floods in Aalborg occurs in topological lows, flat areas in contact with runoff and in areas adjacent to streams, it has been chosen to model depressions, wetness index, and increase in stream water levels.

The modeling of depressions is a simple method in ArcGIS, where sinks are filled by using the Spatial Analyst tool Fill. By subsequently subtracting the filled terrain model from the original terrain model, the depressions are identified in meters. The result showed large geographically depressions in line with previous analysis of the location of flood exposed areas. Since the occurrence of flooding is not only determined by topography, it was concluded that it is necessary to study the designated areas further to assess the real risk in the areas.

Wetness index is a mathematical term given by $\ln(\alpha/\tan\beta)$, where α represents the amount of water flowing to each cell from the upstream, catchment area, and β represents the slope. The calculation of the wetness index provides a measure of soil moisture and hence how high the water table is located in relation to the earth's surface. Large values in the wetness index imply high soil moisture and hence high risk of flooding. In the calculation of α in ArcGIS (given by the Spatial Analyst tool Flow Accumulation), the flow pattern is not consistently accurate compared to the streams in Aalborg. Therefore, the model has to be improved prior to implementation in urban planning. The result of the mapping of the wetness index is further limited by the fact that the model does not provide information about which values of the wetness index, there is a real risk of flooding. Prior to applying the modeling of the wetness index, it will therefore be necessary to gather information about this area.

The modeling of an increase in water levels in the streams of Aalborg was conducted by using the Spatial Analyst tools Euclidean Allocation and Cost Distance. With the use of these tools a simulation of an increase of 20, 50 and 100 centimeters was modeled and the location of flooded areas was identified. When modeling the increase in water levels, the result is contingent upon the particular water level during data recording of the digital terrain model. Therefore, a modeling of a particular increase in water level does not necessarily identify the same flooded areas as the actual flooded areas, if an increase would occur today. Hence, prior to an application of the model, it is necessary to compare the streams elevation of the streams in the digital terrain model to the current elevation of streams.

TITEL:

Kortlægning af oversvømmelsestruede områder

PROJEKT PERIODE:

01.02.2012 – 12.06.2012

VEJLEDERE:

Morten Lauge Pedersen

Bernd Möller

OPLAGSTAL: 5**ANTAL SIDER: 120****UDARBEJDET AF:**

Katrine Olsen

SYNOPSIS:

Denne kandidatafhandling har til formål at undersøge metoder til kortlægning i ArcGIS af oversvømmelsestruede områder. Til opbygning af metoderne anvendes Danmarks højdemodel som datainput, og kortlægningens genstandsfelt er afgrænset til Aalborg byområde.

På baggrund af en analyse af årsagerne til oversvømmelser i Aalborg er det valgt at modellere lavninger, wetness index og vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb. Ved detaljeret at beskrive fremgangsmåden for modelleringen er det hensigten, at modellerne skal kunne anvendes i byplanlægningen i landets kommuner.

Ud fra en diskussion af modellernes begrænsninger, styrker samt resultatet af kortlægningen er modellernes anvendelsespotentiale blevet vurderet.

Af diskussionen konkluderes det, at modellerne kortlægger potentialet for oversvømmelse samt forskellige områders risiko for oversvømmelse i forhold til andre områder. En direkte udpegning af oversvømmelsestruede områder leverer metoderne ikke. Dertil kræver yderligere forbedringer af modellerne samt af datainput.

FORORD

Foreliggende rapport udgør kandidatafhandling på kandidatuddannelsen Integrativ Geografi ved Aalborg Universitet. Afhandlingen er udarbejdet i perioden fra 1. februar 2012 til 12. juni 2012 i samarbejde med vejledere Morten Lauge Pedersen og Bernd Möller.

Kandidatafhandlingen er udarbejdet med henblik på at kunne bidrage med viden og erfaring inden for modellering og kortlægning i ArcGIS af oversvømmelsestruede områder.

Igennem rapporten vil der fremtræde kildehenvisninger, som henviser til en litteraturliste bagerst i rapporten. Kildehenvisningerne i rapporten vil være angivet efter Havard metoden. Der vil i rapporten refereres til kilderne ved [Efternavn, År, evt. sidetal m.m.]. Sidst i rapporten findes en litteraturliste, hvor der er angivet detaljerede oplysninger for de forskellige kilder. Hvis kildehenvisningen er skrevet før punktum, henviser kilden til den pågældende linje. Hvis kildehenvisningen derimod står efter punktum, henvises der til hele det forudgående afsnit.

Når der gennem rapporten henvises til andre afsnit, gøres det med afsnittets nummer og titel. Ligeledes henvises der til figurer og tabeller i rapporten ved numre og eventuelt sidetal. Ved figurer og tabeller angives kilde, hvis disse er indhentet fra eksterne kilder. Er ingen kilde angivet, er figuren eller tabellen udarbejdet af undertegnede.

I rapporten er det flere steder valgt at beskrive modeller, som er blevet udarbejdet under projektets kortlægning af oversvømmelsestruede områder, men som af den ene eller anden grund ikke gav brugbare resultater. Disse beskrivelser illustrerer således min læringsproces, og er opstillet i blå bokse. Rapporten kan godt læses uden om disse.

Jeg sender en særlig tak til afdelingsleder for vandmiljøafdelingen ved Aalborg Kommune; Michael Eilertsen, som har været særlig hjælpsom i forbindelse med udlevering af oplysninger omkring Aalborg Kommunes arbejde med oversvømmelser.

På forsiden ses tre billeder og et kort. Det første billede er publiceret af Thyge Hansen 20. september 2009 på hjemmesiden: Videntcentret for Landbrug. Andet billede på forsiden er taget af Mogens Flint og udgivet i Berlinske Business 6. juli 2011. Tredje billede viser oversvømmelse i en viadukt i Reberbansgade i Aalborg den 21. august 2006, fra Tv2 Galleri. Det store kort er produceret af undertegnede og er en kortlægning af wetness index og vandudbredelse fra vandløb.

INDHOLD

1. FOKUS PÅ OVERSVØMMELSER	5
2. OVERSVØMMELSER I AALBORG BY	7
2.1 Udfordringer for Aalborg Kommune	7
2.2 Fokus på oversvømmelser i Aalborg Kommune	8
2.3 Oversvømmelsesepisoder og deres geografiske lokalisering i Aalborg by.....	9
2.4 Kortlægning af oversvømmelsestruede områder	11
2.4.1 COWI's screening og kortlægning	11
2.4.2 Screeningens anvendelsespotentiale	12
2.5 Problemformulering	13
2.5.1 Uddybning	13
3. PROJEKTETS METODE	15
3.1 Fremgangsmåde	15
3.2 Artikel research.....	18
3.2.1 Usikkerheder ved metoden	18
4. AFSTRØMNING OG KLOAKERING	21
4.1 Afstrømningsveje.....	21
4.2 Urbaniseringens effekt på afstrømningsmønsteret	22
4.3 Kloakering	23
4.4 Afstrømningsmønsteret i byer	25
5. ÅRSAGER TIL OVERSVØMMELSER	27
5.1 Oversvømmelser fra vandløb og af lavninger	27
5.1.1 Oversvømmelse fra vandløb.....	27
5.1.2 Oversvømmelse af lavninger	28
5.2 Faktorer som forstærker oversvømmelsesgraden	28
5.2.1 Oplandets areal, hældning og udformning	29
5.2.2 Vandløbets forgreningsmønster.....	29
5.2.3 Jordens vandindhold	30
5.2.4 Skovrydning	30
5.2.5 Dræning	30

5.2.6 Urbanisering	30
5.3 Oversvømmelse fra afløbssystemer	31
5.4 Årsager til oversvømmelser i Aalborg	33
6. GIS-MODELLER TIL RUMLIG ANALYSE	37
6.1 Digital terrænmodel	37
6.2 Anvendte baggrundskort	37
6.3 Udklip af højdemodellen	38
6.4 Lokalisering af lavninger	38
6.5 Wetness index	39
6.5.1 Fremgangsmåde i ArcGIS: Wetness index uden indførsel af forseglingsprocent.....	40
6.5.2 Fremgangsmåde i ArcGIS: Wetness index med indførsel af forseglingsprocent.....	43
6.6 Modelling af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb	46
6.6.1 Første del: Lokalt differentieret højdeallokeringsmodel.....	46
6.6.2 Anden del: Udbredelsesfunktion ved implementering af værktøjet Cost Distance.....	50
7. PRÆSENTATION AF RESULTATER.....	55
7.1 Lokalisering af lavninger	56
7.2 Wetness index uden indførsel af forseglingsprocent	58
7.3 Wetness index med indførsel af forsegling	60
7.4 Modelling af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb	62
7.5 De oversvømmelsestruede områder	65
8. GIS-MODELLERNES ANVENDELSESPOTENTIALE	67
8.1 Datainputtets begrænsninger	67
8.2 Lavninger	69
8.2.1 Begrænsninger i datainput i forhold til kortlægning af lavninger	69
8.2.2 Modellens begrænsninger og styrker.....	69
8.2.3 Diskussion af resultatet	69
8.2.4 Projektets kortlægning kontra COWI's screening	71
8.2.5 Modellens anvendelsespotentiale	72
8.3 Wetness index uden indførsel af forsegling	72
8.3.1 Begrænsninger i datainput i forhold til kortlægning af wetness index	73
8.3.2 Modellens begrænsninger og styrker.....	73
8.3.3 Diskussion af resultatet	75
8.3.4 Modellens anvendelsespotentiale	76

8.4 Wetness index med indførsel af forsegling	77
8.4.1 Begrænsninger i datainput i forhold til modellering af wetness index med forsegling	77
8.4.2 Modellens begrænsninger og styrker	77
8.4.3 Diskussion af resultatet	78
8.4.4 Modellens anvendelsespotentiale	79
8.5 Modellering af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb	79
8.5.1 Begrænsninger i datainput i forhold til modellering af vandstandsstigning og vandudbredelse ..	80
8.5.2 Modellernes begrænsninger og styrker	81
8.5.3 Diskussion af resultatet	86
8.5.4 Modellens anvendelsespotentiale	88
8.6 Samling af modellerne	89
8.6.1 Modellernes begrænsninger og styrker	89
8.6.2 Modellernes resultater	90
8.6.3 Modellernes samlede anvendelsespotentiale	91
9. KONKLUSION	93
10. VIDEREUDVIKLING AF MODELLERNE	97
LITTERATUR	99
BILAG I: ARTIKEL RESEARCH	104
BILAG II: OVERSIGT OVER FÆLLES- OG SEPARATKLOAKEREDE OMRÅDER I AALBORG	106
BILAG III: PLACERING I AALBORG	110
BILAG IV: UDKLIP AF HØJDEMODEL	111

1. FOKUS PÅ OVERSVØMMELSER

Danmark har de seneste år været hårdt ramt af oversvømmelser i landets byområder. Foruden klimaforandringernes indflydelse påvirker boligbebyggelse i byområder, at risikoen for oversvømmede kældre og huse er et voksende problem. Klimaforandringerne bevirker havvandsstigning, hvorved vandet kan stuve op over terræn. Dette giver størst udslag i forbindelse med vinterens storme. Ligeledes opstår flere nedbørshændelser med kraftigere regnskyl om sommeren og forøget vinternedbør (Miljøministeriet, Transportministeriet, Naturstyrelsen, Kystdirektoratet, December 2011). En fortætning af byområder, som følge af stigende behov for at bo nær bycentre, skaber forøget belægning, hvormed jordoverfladen forsegles, samtidig med at vandets muligheder for at trænge ned i jorden forhindres (Odense Kommune, 2011).

Stigende nedbørsmængder har endvidere forårsaget adskillige oversvømmelser i Centraleuropa. I årene 1998-2002 blev Centraleuropa således ramt af over 100 ekstreme oversvømmelser, som dræbte cirka 700 mennesker og forårsagede ødelæggelser for cirka 25 milliarder euro. Disse oversvømmelsesepisoder banede vejen frem for *Oversvømmelsesdirektivet*, som trådte i kraft oktober 2007. Med *Oversvømmelsesdirektivet* er det formålet, at EU-medlemslandene skal arbejde hen imod at vurdere og styre risikoen for ekstreme oversvømmelser. (Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2011) Som EU-medlemsland har Danmark forpligtiget sig til at følge Direktivets tre plantrin. Første plantrin består i at vurdere og udpege områder, hvor der er risiko for oversvømmelse, mens andet plantrin går på at kortlægge faren for oversvømmelse og oversvømmelsesrisikoen i de udpegede risikoområder. Endelig skal der med tredje plantrin udarbejdes risikostyringsplaner for de udpegede risikoområder. (Task Force for Klimatilpasning i Naturstyrelsen, 2011) Risikoplanerne skal have fokus på forebyggelse, sikring og beredskab og samtidig skal klimaændringerne inkluderes i planerne.

Den type oversvømmelse, som Direktivet henvender sig imod er givet ved følgende definition:

“ ‘flood’ means the temporary covering by water of land not normally covered by water. This shall include floods from rivers, mountain torrents, Mediterranean ephemeral water courses, and floods from the sea in coastal areas, and may exclude floods from sewerage systems.” (The European Parliament and the Council of the European Union, 2007, s. 288/29)

Det fremgår af ovenstående definition, at næsten alle typer oversvømmelser indgår i Direktivets søgelys, hvorimod oversvømmelser fra spildevandssystemer kan udelukkes. DHI tolker sidstnævnte til, at der lægges op til et individuelt valg, om hvorvidt det ønskes at analysere spildevandssystemer (Aarhus Kommune, 2007).

I Danmark er de tre plantrin implementeret gennem lovene ”Lov om vurdering og styring af oversvømmelsesrisikoen fra vandløb og søer” og ”Bekendtgørelse om vurdering og risikostyring for oversvømmelser fra havet, fjorde eller andre dele af søterritoriet”. Det fremgår af disse, at Miljøministeren og Kystdirektoratet har ansvaret for udførslen af *Oversvømmelsesdirektivets* første og andet plantrin for henholdsvis oversvømmelser fra vandløb og søer og oversvømmelser fra havet og fjorde. Udførslen af

risikostyringsplaner er derimod pålagt landets kommuner som ansvarsområde. (Poulsen, 2009) (Vestergård, 2010)

Første plantrin blev færdigbehandlet december 2011, hvorved en rapport er udarbejdet, som udpeger områder, hvor det ikke kan afvises, at ekstreme oversvømmelser vil forekomme i fremtiden. Disse udpegninger er foretaget på baggrund af historiske informationer, screening af potentielle oversvømmelsestrusler samt en efterfølgende høring hos kommunerne. Herved er følgende 10 risikoområder blevet udpeget: Holstebro, Randers Fjord, Juelsminde, Vejle, Fredericia, Aabenraa, Odense Fjord, Køge Bugt, Korsør og Nakskov. I henhold til Oversvømmelsesdirektivets fortolkning af begrebet "Oversvømmelsesrisiko" er risikoområderne endvidere udpeget ud fra det kriterium, at området har en ejendomsværdi på over to milliarder kroner samtidig med, at oversvømmelserne rammer minimum 500 ejendomme. (Miljøministeriet, Transportministeriet, Naturstyrelsen, Kystdirektoratet, December 2011) Udvælgelsen har skabt røre blandt nordjyske kommuner. Her undrer de nordjyske kommuner tillige Kommunernes Landsforening sig over, at byer omkring Limfjorden ikke er medtaget som risikoområde. Hertil svarer Kystdirektoratet, at de oversvømmelsestruede bydele i de større byer omkring Limfjorden ligger langt fra det fastsatte kriterium på to milliarder kroner i ejendomsværdi. (Holm, 2012)

I Aalborg Kommune skaber storm tilbagevendende oversvømmelser på havnefronten både på Aalborgsiden og Nørresundbysiden. Dette har gjort det nødvendigt at højvandssikre områderne ved at hæve kajkanten i flere etaper, hvor den sidste, som forventes færdig i 2013, hæver kajkanten fra en nuværende højde på 1,5 meter til 1,9 meter over havoverfladen (Nordjyske.dk, 2011). Forøgede nedbørsmængder har ligeledes skabt oversvømmelser mange steder i Aalborg by, her rammes lavtliggende arealer samt områder, som grænser op til byens åer. Her kan blandt andet nævnes områder som Limfjordstunnellen, Vejgaard, kolonihaveforeningen Kildely ved Sønderbro, Østerådal, Tornhøjparken i Aalborg Øst og Håndværkervej (Nordjyske.dk, 2006-2011). På trods af at Aalborg by ikke indgår som risikoområde i Miljøministeriets og Kystdirektoratets udpegning, er der alligevel behov for en undersøgelse og kortlægning af byens oversvømmelsestruede områder, for derved at kunne inddrage risikoen i den videre byplanlægning.

2. OVERSVØMMELSER I AALBORG BY

Med dette kapitel er det formålet at undersøge hvilke oversvømmelsesepisoder, der har fundet sted i Aalborg by samt oversvømmelsernes geografiske placering i byområdet. Løbende hermed behandles, hvorledes der arbejdes med oversvømmelser og screening af oversvømmelsestruede områder ved Aalborg Kommune.

2.1 Udfordringer for Aalborg Kommune

Aalborg Kommune står over for en række udfordringer som følge af klimaforandringer. Disse klimaforandringer giver udslag i øgede og mere ekstreme nedbørshændelser samt havvandsstigninger. Det er derfor nødvendigt for Aalborg Kommune at lægge fokus på klimaændringernes konsekvenser for på den baggrund at kunne forebygge oversvømmelser i Kommunen.

Med rapporten *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015*, som er udarbejdet august 2011, behandler Aalborg Kommune klimaændringernes konsekvenser, samtidig med at oversvømmelsestruede områder i Kommunen udpeges. Heri er det beskrevet, hvordan Kommunen er på forkant med klimaforandringerne. Aalborg Kommune ser det netop nødvendigt, at inddrage klimatilpasning i den kommunale planlægning, da planer om infrastruktur og byfornyelse har lange udsigter. For at afdække klimaforandringens konsekvenser er der i rapporten taget udgangspunkt i vidensgrundlag udarbejdet af FN's klimapanel (IPCC), samt Klima- og Energiministeriets anbefaling om anvendelse af klimascenarie A1B. Ved brug af dette klimascenarie forventes en temperaturstigning på 2-3°C, en forøget årsnedbør på 22 % samt en havvandsstigning på 0,1-1,2 meter frem mod år 2100. (Aalborg Kommune, 2011)

Klimaforandringerne i forhold til nedbørshændelser er desuden undersøgt af Karsten Arnbjerg-Nielsen, professor ved DTU. Via statistiske analyser baseret på måleresultater fra 41 regnmålere i Danmark over en periode på 20 år, beskriver Arnbjerg-Nielsen, hvordan nedbørshændelser har og vil ændre sig i fremtiden nationalt og regionalt. Analysens resultat indikerer, at nedbørshændelser i fremtiden vil forekomme hyppigere og med større hastighed. Især for Sjælland var der en klar tendens af, at nedbørshændelser både forekommer oftere og mere ekstremt. For Jylland kunne det konkluderes, at nedbørshændelser bliver mere ekstreme i fremtiden. (Arnbjerg-Nielsen, 2006)

Dermed er der lagt op til, at Aalborg Kommune står over for en planlægning af, hvorledes dette vand håndteres i fremtiden. I den forbindelse vil Kommunen blandt andet skulle sikre byerne mod oversvømmelse, sikre vandløb mod større udledning af vand, udbygge kloaksystemerne, så de kan kapere de fremtidige nedbørsmængder og sikre kystnære områder ved havvandsstigninger. (Aalborg Kommune, 2011)

En forøgelse af nedbørsmængderne i Aalborg by betyder, at der vil være en større afstrømning til vandløbene, hvorfor der generelt vil være mere vand heri. Dette medfører, at der kan opstå oversvømmelser af de arealer, der grænser op til byens vandløb. Ligeledes vil lavtliggende områder blive udsat for oversvømmelse ved forøgede nedbørsmængder. (Aalborg Kommune, 2011)

I den fremadrettede planlægning og byfornyelse kræver det, at Kommunen indregner fremtidige nedbørsmængder, således at der ikke vil være nogen områder, som overbelastes af afstrømningen. Byfornyelse medfører endvidere en forøgelse af afstrømningen, i og med at regnvandets nedsynkning i jorden forhindres ved vejanlæggelse og boligbyggerier. Aalborg Kommune vil derfor se på alternativer og supplerende løsninger for håndteringen af regnvandet. (Aalborg Kommune, 2011)

Den forøgede nedbørsmængde vil belaste kloaksystemerne og dermed forårsage yderligere problemer. I kloakerede oplande vil regnvandet belaste overløbsbygværker, hvorved vandet bliver ført til recipienter. Aalborg Kommune forventer dog, at Aalborgs kloaksystemer kan aflede de stigende nedbørsmængder, som klimaforandringerne foreskriver. Derimod forventes kloaksystemet ikke at kunne kapere sommerens ekstremregn, hvilket er en betegnelse for de nedbørsmængder, som kloaksystemerne ikke kan kapere. Skybruds kraftige nedbørsmængder anslås dermed at kunne overstige kloaksystemernes kapacitet, idet systemerne ikke vil kunne lede vandet hurtigt nok væk. (Aalborg Kommune, 2011)

Når nedbørsmængderne forøges stiger grundvandsspejlet ligeledes. Dette vil kunne give oversvømmelser, som vil vise sig langs vandløb, hvorfor der vil opstå øget behov for dræninger. Videre vil risikoen for oversvømmelse af vandforsyningsanlæg forøges, samtidig med at grundvandsstigningen vil medføre underminering af infrastruktur. (Aalborg Kommune, 2011)

Havvandsstigninger omkring Danmark giver oversvømmelsesproblemer på arealerne langs med Limfjorden. Her udsættes de lavtliggende kystområder, som eksempelvis strandenge, for oversvømmelser. Yderligere kan havvandsstigningerne medføre erosion og tilbagetrækning af kysterne samt oversvømmelse af landbrugsarealer, bygninger, veje, broer og anden infrastruktur. Vandstandsstigningen kan videre få konsekvenser for vandløbene, da vandets passage i åer gennem kanaler besværliggøres ved højere vandstande. (Aalborg Kommune, 2011)

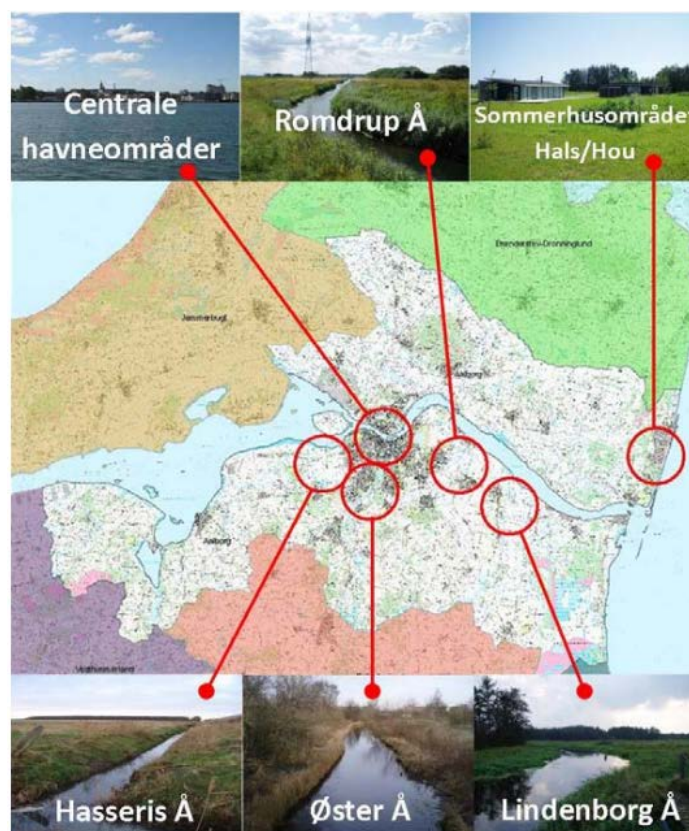
Det fremgår af ovenstående, at klimaændringer giver anledning til flere forskellige typer af oversvømmelser i Aalborg Kommune. Kommunen står derfor overfor en række udfordringer i arbejdet med at forebygge oversvømmelser, hvorfor det betragtes nødvendigt at sætte oversvømmelser i fokus.

2.2 Fokus på oversvømmelser i Aalborg Kommune

Med udgivelse af *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015*, har Aalborg Kommune for alvor lagt fokus på oversvømmelser og oversvømmelsesrisiko i Kommunen. Med rapporten beskrives den fremadrettede planlægning, som er nødvendig for at undgå oversvømmelser. Rapporten lægger således fokus på, hvordan det er muligt i Aalborg Kommune at planlægge sig ud af oversvømmelsesproblemer ved eksisterende by- og landbrugsområder samt i forbindelse med den fremadrettede byfornyelse. Et telefoninterview af afdelingsleder for vandmiljøafdelingen ved Aalborg Kommune; Michael Eilertsen, bekræfter, at Kommunen har stort fokus på risikoen for oversvømmelser og især på, hvordan Kommunen via planlægning kan undgå oversvømmelser eller minimere deres omfang. Michael Eilertsen påpeger, at Klimastrategien kun lige er vedtaget, og dermed at Aalborg Kommune befinder sig på et stadie, hvor de skal påbegynde dens implementering. (Michael Eilertsen, 15.02.2012)

I *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015* er der i samarbejde med COWI udpeget seks geografiske områder, som anses for værende i særlig oversvømmelsesfare. Dette er de centrale havneområder, Romdrup Å, sommerhusområdet Hals/Hou, Hasseris Å, Øster Å, Lindenberg Å, jævnfør Figur 1. Via

udpegningen af fokusområderne er det fastsat som mål i *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015*, at der skal udarbejdes en konkret metode, til at fastlægge klimarisikoen inden for de seks områder, hvilken skal være indarbejdet i alt relevant kommunal myndighedsbehandling i 2015. Udpegningen skal videre ligge til grund for en mere detaljeret undersøgelse af udsatte områder, og det skal inden 2015 være klarlagt, hvorvidt der er behov for en kommunal indsats i de seks områder. (Aalborg Kommune, 2011)



Figur 1: Oversvømmelsestruede områder udpeget i *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015* (Aalborg Kommune, 2011, s. 33).

Af konkrete planlægningsstrategier lægger *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015* vægt på LAR (Lokal Afledning af Regnvand), hvorved regnvandet, i stedet for at blive ledt ned i kloaker, fordampes, nedsives eller anvendes, der hvor den falder (Aalborg Kommune, 2011). Ifølge Michael Eilertsen er LAR-løsninger påbegyndt implementeret i Aalborgs byplanlægning, hvor håndtering af regnvand indgår i byfornyelsesområderne ved Godsbanearialet og ved Eternitgrunden (Michael Eilertsen, 15.02.2012). Med *Vision 2100*, hvilken er en rapport udarbejdet af Aalborg forsyning, Kloak A/S, fokuseres på omlægning af kloaksystemerne i Aalborg Kommune fra fælleskloakering til separatkloakering (Aalborg Forsyning, Kloak A/S). Derved bliver kloakkerne bedre rustet til at kapere fremtidige nedbørsmængder og anses derfor af Aalborg Kommune, som værende en fundamental strategi i forebyggelsen af oversvømmelser (Aalborg Kommune, 2011).

2.3 Oversvømmelsesepisoder og deres geografiske lokalisering i Aalborg by

De seks udpegede områder i *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015* afspejler således, hvor Aalborg Kommune har registreret eller forventer, at der i fremtiden kan blive problemer med oversvømmelser.

Havneområderne i Aalborg by er et eksempel på et område, som oplever gentagne oversvømmelser i forbindelse med storm og stormfloder. Så sent som i november og december 2011 blev havnefronten og boliger herpå oversvømmet to gange. Den sidste af disse var oversvømmelserne den 9. 10. og 11. december 2011, hvor årsagen tilskrives stormflod. Her blev hele Limfjordsområdet ramt af oversvømmelser og vandstanden steg 1,33 meter over det normale, hvilket statistisk set kun forekommer hvert 38. år. (Wormslev, Der var stormflod i hele fjorden , 2011) Tilbage i januar 2007 blev begge sider af Limfjordsbroen ramt af oversvømmelser. Igen var storm den bagvedliggende årsag til oversvømmelserne, og vandstanden steg op til 1,28 meter, da den var på sit højeste. (Randers, Højeste vandstand i Aalborg i mange år , 2007)

Områderne langs Øster Å (se placering i BILAG III: PLACERING I AALBORG) har gentagne gange været ramt af oversvømmelser i større eller mindre grad. Her kan høj grundvandsstand i visse områder være med til at forværre problemerne (Michael Eilertsen, 15.02.2012). Det kan således være tilfældet i Kærby og i kolonihaveforeningerne Ålykke, Kildely, Engen og Ådalen. Med august 2006, som satte rekord som værende den vådeste måned i 40 år (Jørgensen & Siewert, 2007), blev Aalborg og i sær områder omkring Øster Å udsat for usædvanlig store nedbørsmængder. For haveselskabet Ålykke i Kærby betød dette, at vandet stod halvanden meter inde i husene (Lenskjold, Udsigt til tørvej indendørs , 2006). Håndværkervej blev ligeledes påvirket af de store vandmasser, her oplevede flere virksomheder vandstande på en meter indenfor (Hansen, Vandskader for millioner , 2006). Desuden bevirkede de store nedbørsmængder til, at der var afvandingsproblemer i Hasseris Enge (Michael Eilertsen, 15.02.2012).

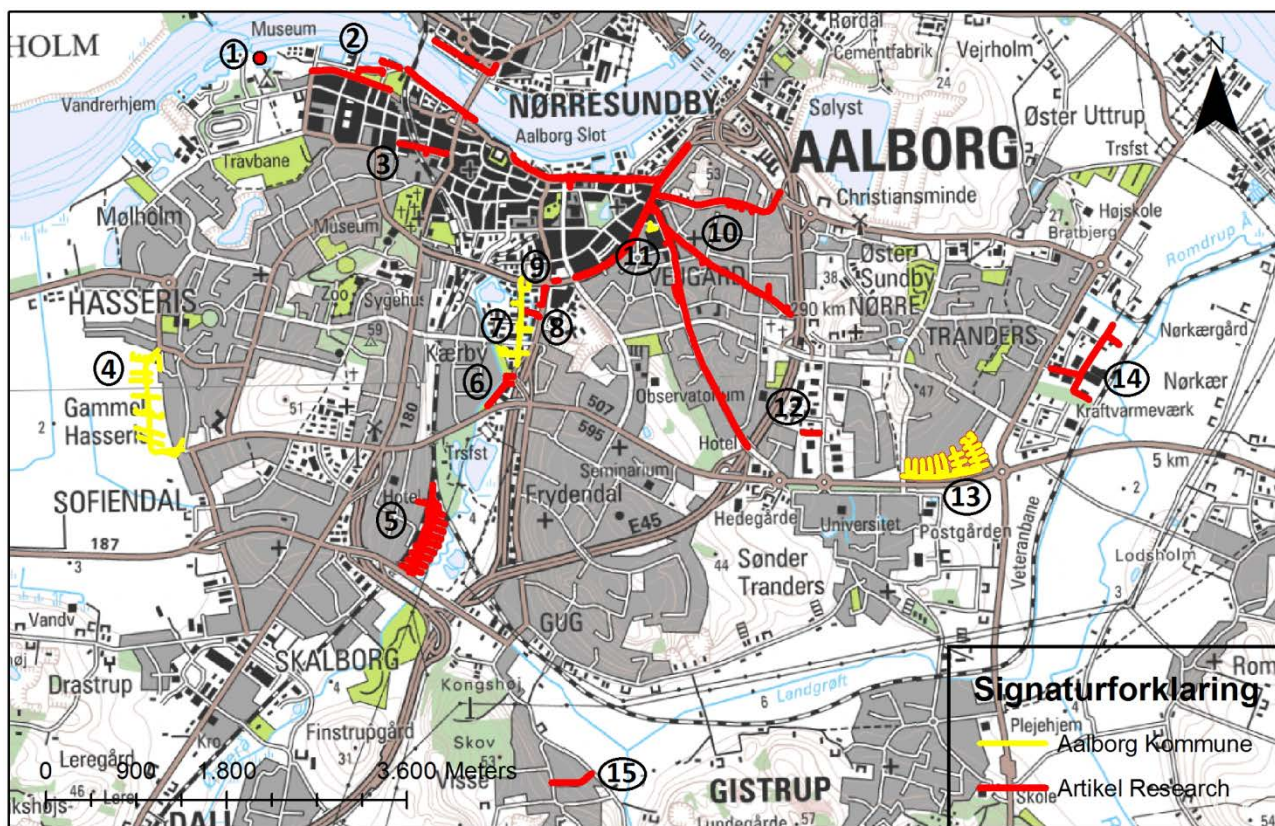
I forbindelse med samme nedbørshændelser i 2006 blev flere områder i Aalborg Øst oversvømmet. Haver, huse og veje blev oversvømmet i den laveste del af Tornhøjparken. Her stod vandet halvanden meter over asfalten, da oversvømmelsen var på sit højeste. Forklaringen på oversvømmelserne i dette område skal, foruden de store nedbørsmængder, findes i, at området er lavt placeret topografisk samtidig med, at kloakkerne var underdimensionerede (Lenskjold, Oversvømmet af regn og kloakvand , 2006). I forbindelse hermed skal det nævnes, at Svendborgvej ligeledes blev oversvømmet (Lenskjold, Vand i vaskeriet , 2006).

Foruden de udpegede oversvømmelsestruede områder har Vejgaard og især Vejgaard Torv også i en årrække været plaget af oversvømmelser. Disse skyldtes manglende kapacitet i kloaker og stor afstrømning af regnvand fra omkringliggende områder til bydelen. Efter udbygning af kloaksystemerne skulle Vejgaard dog i dag være fri for de fleste oversvømmelser. (Michael Eilertsen, 15.02.2012) Kloakudbedringen har fundet sted på Nørre Tranders vej og Øster Sundby vej fra omkring 2001 og fem år frem, hvorefter en tilsvarende udbedring fandt sted af kloaksystemerne på Hadsundvej, Østre Allé og Øgadekvarteret. (Schouenborg, Slut med højvande i kælderen, 2005)

Af ovenstående oversvømmelsesepisoder fremgår det, at oversvømmelsesscenarierne i Aalborg by kan opdeles i tre hovedkategorier:

1. Oversvømmelse fra Limfjorden grundet storm og forhøjet vandstand.
2. Oversvømmelse fra vandløb grundet store nedbørsmængder og deraf voksende afstrømning til vandløbene.
3. Oversvømmelse i lavtliggende områder grundet store nedbørsmængder og manglende kapacitet i kloaksystemerne.

Det fremgår endvidere af ovenstående oversvømmelsesepisoder, at de udsatte områder er meget spredt geografisk i Aalborg by. De områder som har været udsat for oversvømmelser er visualiseret i Figur 2.



Figur 2: Lokalisering af områder som har været oversvømmet i større eller mindre omfang i Aalborg området (jf. Michael Eilertsen fra Aalborg Kommune (gul) og ved artikel research af Nordjyske.dk (rød). Nr. angivelse: 1) Strandparken Camping 2) Havneområderne: Mellem Broerne, Vestre Havnepromenade, Vestre Bådehavn, Aalborg Roklub, Nyhavnsgade, Peder Skrams Gade og Søsportsvej 3) Reberbansgade 4) Hasseris Enge-området 5) Engen og Ådalen 6) Ålykke 7) Håndværkervej 8) Nållemagervej 9) Kildely 10) Vejgaard området: Nørre Tranders Vej, Øster Sundby Vej, Hadsundvej og Østre Alle 11) Vejgaard Torv 12) Vardevej 13) Tornhøjparken 14) Svendborgvej 15) Ladegårdsvej. Kortdata: Danmarks Topografiske Kortværk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98. Dansk Adresse- og Vejdatabase: Ophavsrettigheder: DAV. Beregnede adressekoordinater: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98.

Med en afklaring af at fremtiden byder på mere ekstremregn i Aalborg, kan en kortlægning af områder, som tidligere har været udsat for oversvømmelse, ikke afdække fremtidens oversvømmelsestruede områder. Det er derfor nødvendigt at behandle metoder til lokalisering af oversvømmelsestruede områder.

2.4 Kortlægning af oversvømmelsestruede områder

Aalborg Kommune har, som tidligere beskrevet, udpeget seks geografiske områder som anses for oversvømmelsestruede i Aalborg Kommune, jævnfør Figur 1, side 9. Med udpegningen var det for Aalborg Kommune målet at danne et overblik over, hvor risikoen for oversvømmelser var størst grundet klimaændringerne. Det ønskedes at få tegnet de store linjer, udtaler Michael Eilertsen, afdelingsleder for vandmiljøafdelingen i Aalborg Kommune. (Michael Eilertsen, 15.02.2012)

2.4.1 COWI's screening og kortlægning

En visualisering af klimaforandringernes konsekvenser i forhold til oversvømmelser har COWI udarbejdet for Aalborg Kommune med udgivelse i august 2011 i *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015*. Der er heri

udarbejdet en screening af potentielle oversvømmelsestruede områder, strømningsveje, områder direkte påvirket af langvarige højvande og sårbare områder, hvor sandsynligheden og effekten af oversvømmelse vil være størst. I screeningen er der udpeget de seks potentielt mest udsatte risikoområder for oversvømmelse i Aalborg Kommune. De udpegede områder ses i Figur 1, side 9, mens de detaljerede kort ses i Aalborg Kommune, Klimastrategi - Tilpasning 2012-2015, 2011.

De færdige kort er fremstillet på baggrund af en korrigeret højdemodel for Aalborg Kommune. På det grundlag er der udarbejdet en detaljeret terrænmodel, som viser, hvor i terrænet der er lavninger, lavningernes opland, strømningsveje for vand og havvandsstigningers udbredelse over terræn. Med lavningerne er der i modellen specificeret, at der er tale om lavpunkter, hvor arealet er minimum 1000 m², og hvorudfra der ikke er et naturligt vandafløb. Strømningsvejene angiver vandets naturlige strømning i oplandet frem mod lavningerne. For at kortlægge havvandsstigningers udbredelse er klimascenarie A1B anvendt, hvorfor der regnes på en generel havvandsstigning på 1 meter. Ved stormflod regnes der med en havvandsstigning på 1,42 meter, hvilken er den nuværende 100 års hændelse. Dermed giver en stormflod i år 2100 en havvandsstigning på 2,42 meter. (Aalborg Kommune, 2011)

Til udvælgelsen af de seks oversvømmelsestruede områder er, foruden screeningens resultater, anvendt eksisterende viden om oversvømmelsesproblemer. Samtidig er oversvømmelser i disse områder vurderet som værende den største risici for kommunens udvikling, og dermed er udpegningen vurderet i forhold til, hvor ødelæggelserne vil kunne forårsage de største økonomiske omkostninger. (Aalborg Kommune, 2011)

2.4.2 Screeningens anvendelsespotentialer

Med udpegningen på plads er det nu opgaven for Kommunen at planlægge, hvorledes oversvømmelser af bebyggelse eller vigtige naturarealer kan minimeres eller undgås. Screening skal derfor anvendes vejledende i forbindelse med eventuelle byfornyelser. Samtidig indikerer den, hvor det er nødvendigt at gribe ind og sikre mod fremtidige oversvømmelser. (Michael Eilertsen, 15.02.2012)

I *Klimastrategi – Klimatilpasning 2012-2015* lægges der op til, at der er behov for en yderligere undersøgelse og kortlægning af særligt problemfyldte områder. Først derved er det muligt at konkretisere, hvilke områder der oversvømmes. (Aalborg Kommune, 2011) Morten Rokkjær, miljøingeniør ansat ved Aalborg Kommune, uddyber dette og forklarer, at modellen ikke indeholder dræn og vandløbsprofiler, hvilket han betragter som en mangel. Dette er, ifølge Morten Rokkjær, årsagen til, at modellen kun opfattes som en screening, og hvorfor den ikke på detaljeniveau kan anvendes i den videregående planlægning. Med hensyn til en videre kortlægning af oversvømmelsestruede områder, udtaler Morten Rokkjær dog, at Aalborg Kommune endnu ikke har taget stilling til detaljeringsgraden, men at det forventes at blive gjort i foråret 2012. (Morten Rokkjær, 17.02.2012)

En mere detaljeret kortlægning vil kunne anvendes til at se, hvor Aalborg kan udvides med bolig- og industriområder, om der skal ændres på arealanvendelsen, og hvorvidt en beskyttelse af infrastrukturelle anlæg er nødvendig. På den måde kan klimatilpasningen tænkes ind i lokalplaner, miljøplaner og mange andre fagfelter. (Morten Rokkjær, 17.02.2012)

2.5 Problemformulering

Af ovenstående problemanalyse er det konkretiseret, at der er behov for en detaljeret kortlægning af oversvømmelsestruede områder. Først derved kan en udpegning af oversvømmelsestruede områder anvendes i den kommunale byplanlægning. På baggrund heraf opstilles følgende problemformulering:

Hvordan kan højdemodeller i ArcGIS anvendes til kortlægning af oversvømmelsestruede områder og hvilket anvendelsespotentiale har kortlægningen?

2.5.1 Uddybning

I projektet vælges det at fokusere på oversvømmelser grundet nedbør, hvorved fokus i kandidatafhandlingen vil være oversvømmelser fra vandløb og i lavninger.

Ud fra et geografisk perspektiv er det valgt at modellere oversvømmelsestruede områder ud fra topografien, hvorfor det vælges at anvende Danmarks højdemodel som datainput for GIS-analyserne.

For at kunne besvare problemformuleringens første spørgsmål, opfattes det nødvendigt først at undersøge hvorfor oversvømmelser opstår i Aalborg. I denne undersøgelse behandles de udpegede områder, som allerede har været udsat for oversvømmelse, som udgangspunkt. Ved en afklaring af årsagerne til oversvømmelser i Aalborg undersøges mulige GIS-metoder til rumlig analyse.

På baggrund af denne undersøgelse udvælges metoder til modellering af oversvømmelsestruede områder i Aalborg. Ved denne modellering samt en kortlægning af resultaterne ønskes det at gennemgå modellerne dybdegående for eventuelle fejl og mangler, samtidig med at modellernes styrker behandles. På baggrund heraf er det formålet at kunne besvare problemformuleringens andet spørgsmål.

I den følgende kandidatafhandling skal det bemærkes, at der skelnes mellem *allerede udsatte områder*, som er de områder, der tidligere har været udsat for oversvømmelser, udpeget i problemanalysen ved interview af Michael Eilertsen ved Aalborg Kommune og ved den udarbejdede artikel research og *projektets kortlægning*, som knytter sig til min kortlægning af GIS-modellernes resultater.

Hvordan projektarbejdet detaljeret er grebet an, og begrundelsen bag de valg, der er truffet undervejs i projektperioden, fremgår af følgende kapitel.

3. PROJEKTETS METODE

I dette kapitel beskrives projektets metode, og herunder hvordan projektet er grebet an samt hvilke overvejelser, der har lagt bag de valg, der er truffet undervejs i projektforløbet. I projekts indledende kapitel; 2. OVERSVØMMELSER I AALBORG BY, er der i lokaliseringen af *allerede udsatte områder* i Aalborg foretaget en artikel research. Fremgangsmåden herfor samt usikkerheder forbundet med metoden, vil ligeledes behandles i dette kapitel.

3.1 Fremgangsmåde

Kommende huskøberes og byplanlæggeres ønske om en kortlægning af oversvømmelsestruede områder i forhold til fremtidige investeringer er blevet fremstillet i medierne, se eksempelvis Mølsted, 2011.

Interessen er skærpet i forbindelse med et fokus på klimaændringer samt oplevelse af regnfulde somre, hvorved der er opstået en frygt for at boliger eller kommende byggerier ikke kan klare fremtidige nedbørshændelser. Der er derfor gennem medierne og Oversvømmelsesdirektivet blevet lagt pres på de danske kommuner for en kortlægning af oversvømmelsestruede områder. Med udgangspunkt heri, er det målet med dette projekt at give byplanlæggere nogle modeller og retningslinjer til at kunne gennemføre denne kortlægning.

Med projektets overordnede emne på plads skulle projektets retning og fokus efterfølgende præciseres. Med en interesse for ArcGIS som værktøj til kortlægningen af oversvømmelsestruede områder var det nødvendigt at indsnævre projektets geografiske fokusområde, for dermed at kunne udføre de relevante kortlægningsmetoder i programmet. Ved den geografiske indsnævring kan beregningerne i ArcGIS netop gennemføres ved hurtigere hastighed. Efter en kort research af områder i Danmark, som gentagende gange udsættes for oversvømmelser, faldt valget på Aalborg som geografisk genstandsfelt. Valget blev truffet på grund af mit kendskab til byen, i form af dens geografiske opdeling og indhold, hvilket jeg vurderede som en fordel i forbindelse med kortlægningen. At der i Aalborg Kommune tilsvarende arbejdes med oversvømmelser og kortlægning af oversvømmelsestruede områder vejede ligeledes tungt i beslutningen af Aalborg som fokusområde, da et samarbejde derved kunne opstå samtidig med, at mine resultater efterfølgende kunne anvendes af Kommunen som inspiration i deres arbejde samt i en efterfølgende byplanlægning.

Projektets efterfølgende fremgangsmåde fremgår af Figur 3. Det fremgår af flow diagrammet, at der med valg af Aalborg som genstandsfelt påbegyndes et litteraturstudie og artikel research samtidig med, at der foretages et interview. Disse undersøgelser skulle bidrage til at opnå viden om Aalborg Kommunes igangværende arbejde med kortlægning af oversvømmelsestruede områder samt skabe fundamentet for at lokalisere *allerede udsatte områder*. I litteraturindsamlingen blev Aalborg Kommunes rapport Klimastrategi – Tilpasning 2012-2015 primært anvendt, da Kommunens udfordringer samt udførsel af oversvømmelsesscreeningen var beskrevet heri. Ud fra rapporten kunne der ligeledes skabes et overblik over oversvømmelsernes kilder og årsagerne til deres forekomst. Gennem telefoninterview med afdelingsleder for vandmiljøafdelingen ved Aalborg Kommune; Michael Eilertsen, blev kommunens arbejde med kortlægningen bekræftet og der blev udpeget områder, som havde været oversvømmet gentagne gange i Aalborg by. Denne udpegning medvirkede sammen med en artikel research til, at jeg kunne

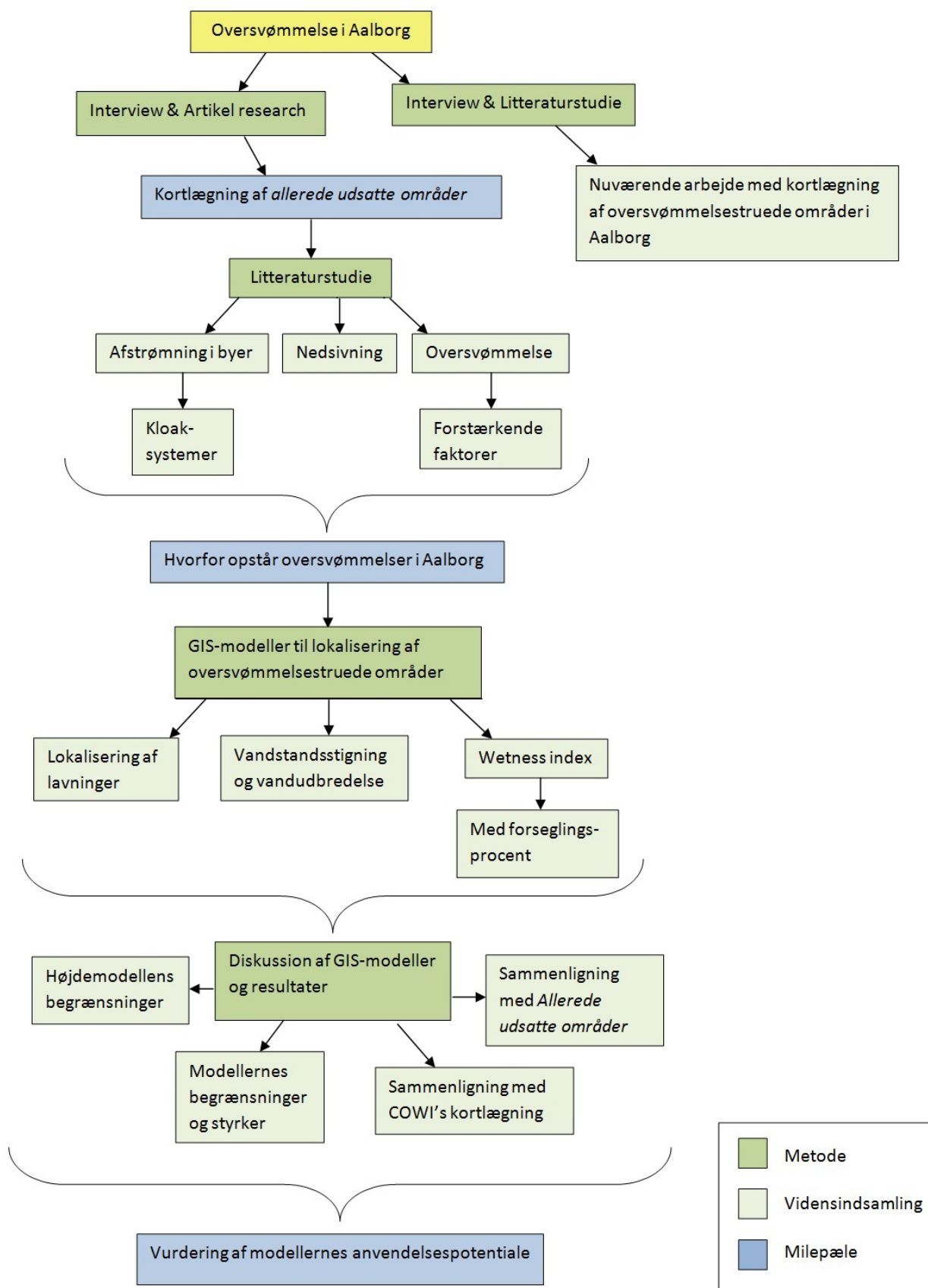
kortlægge de *allerede udsatte områder* i Aalborg. Det blev vurderet relevant at undersøge, hvad der er af igangværende arbejde på området, både med henblik på at opnå inspiration til kortlægningsmetoder samt til at opbygge en problemstilling, som ikke allerede er gennemarbejdet, således at mit projekt kan bidrage i kommuners videre planlægning. Kortlægningen af *allerede udsatte områder*, skal bidrage til at vurdere projektets GIS-modeller og de udarbejdede korts anvendelsespotentiale til lokalisering af oversvømmelsestruede områder. Hvis GIS-kortene således udpeger de samme områder, som der allerede har været udsat for oversvømmelser, indikerer dette, at kortene og dermed GIS-modellerne er brugbare.

Med en beskrivelse af oversvømmelsers omfang og placering i Aalborg by kunne projektets problemstilling formuleres. Af afsnit 2.5 Problemformulering fremgår det, at det er valgt at fokusere på oversvømmelser, der forårsages af længerevarende eller kraftige nedbørshændelser. Det blev vurderet nødvendig at vælge fokus efter oversvømmelsens kilde – hvorvidt det er fra havet eller på grund af nedbør, da GIS-modellerne til kortlægningen af de to forskellige scenarier varierer. At valget faldt på nedbør som oversvømmelseskilde skyldes, at kortlægning af havvandsstigningerne i forvejen er et udbredt genstandsfelt for adskillige undersøgelser i Danmark. Jeg opfatter derimod kortlægningen af nedbørsforårsagende oversvømmelser som et område, hvor der er behov for nye og forbedrede kortlægningsmetoder.

Forud for projektets GIS-analyse og bearbejdning af modellerne hertil, var det nødvendigt at forstå, hvordan oversvømmelser i Aalborg opstår og under hvilke forhold. Til at besvare dette spørgsmål blev en ny litteratursøgning igangsat. Herunder blev der indsamlet viden om afstrømningsmønstre i naturen og byer samtidig med, at det blev undersøgt, hvordan lokale forhold, såsom oplandets areal og jordens vandindhold, får indflydelse på oversvømmelsens indtræden. Den indsamlede viden sammen med en mindre GIS-analyse af placeringen af *allerede oversvømmede områder* i forhold til topografi og vandløbenes strømningsmønstre gjorde det muligt at beskrive årsagerne til, at de *allerede udsatte områder*, er blevet oversvømmet.

Projektets kortlægning af oversvømmelsestruede områder kunne på baggrund af den indsamlede viden påbegyndes. Valget bag de udarbejdede GIS-modeller blev truffet på baggrund af den opnåede viden om årsagerne til oversvømmelser i Aalborg. Fremgangsmåden for opbygningen af modellerne blev sammen med teorien herfor detaljeret beskrevet i kapitel 6. GIS-MODELLER TIL RUMLIG ANALYSE. I den forbindelse indførtes fremgangsmåden ved hjælp af Modelbuilder, og hvert enkelt anvendt værktøj i ArcGIS blev forklaret. Det var valgt, at udarbejde denne detaljerede beskrivelse af fremgangsmåden i ArcGIS, således at de udarbejdede modeller kunne tages i brug i den kommunale planlægning eller af andre interesserede. Det første kort, der blev udarbejdet, er en lokalisering af lavninger. Dernæst blev wetness index kortlagt, hvilket udpeger områder, der har potentiale for et højt grundvandsspejl. Denne model udførtes med og uden inddragelse af lokal forseglingsprocent. Efterfølgende blev vandstandsstigninger og deraf vandudbredelse fra vandløb modelleret, hvorved det var muligt at kortlægge, hvilke områder der er udsat for oversvømmelse, når vandstanden i Aalborgs vandløb stiger.

Efter en præsentation af resultaterne af kortlægningen blev de forskellige metoders begrænsninger og styrker diskuteret, med henblik på at kunne vurdere modellernes anvendelsespotentiale til kortlægning af oversvømmelsestruede områder. Dette udførtes først og fremmest ved at sammenligne *projektets kortlægning* med lokaliseringen af de *allerede udsatte områder*, udpeget i projektets problemanalyse. Hvis *projektets kortlægning* således ikke udpeger de samme områder, som i kortlægningen af *allerede udsatte områder*, indikerer dette, at metoden mangler parametre, som bør medtages i den endelige model.



Figur 3: Flow diagram for projektforløbet.

3.2 Artikel research

Til at lokalisere områder i Aalborg, som allerede har været udsat for oversvømmelse, blev der foretaget en artikel research, hvor resultatet heraf fremgår af Figur 2, side 11. Denne metode blev anvendt, da det blev antaget, at oversvømmelser i byområder vurderes som værende af nyhedsværdi, hvorfor det må formodes at få et betydeligt fokus i landets aviser. Forud for undersøgelsen var der derfor en formodning om, at oversvømmelser sammen med en beskrivelse af oversvømmelsens udbredelse og årsager vil afdækkes i landets aviser.

Da Aalborg by er valgt som fokusområde, blev Nordjyske vurderet som den mest repræsentative nyhedskilde til afdækningen af oversvømmelserne i byen. Artikel researchen blev derfor udført via <http://Nordjyske.dk>. Via avisens hjemmeside blev der i sidens søgefelt søgt på emneområdet "oversvømmelse Aalborg". Herved fremkom en række artikler, som indeholdt ordene "oversvømmelse" og "Aalborg". Efterfølgende var det nødvendigt at sortere artiklerne for relevans, da der fremkommer en række artikler, som ikke handler om oversvømmelse som en midlertidig vanddækning af arealer, men derimod bruger ordet i overført betydning. Ligeledes skulle artiklerne sorteres for geografisk lokalitet, således at der kun medtages oversvømmelser i Aalborg by. Sorteringen kunne i mange tilfælde foretages på baggrund af overskriften og den lille tekst, som fremkommer under overskriften i hjemmesidens resultater for søgningen, andre gange var det nødvendigt at åbne artiklen og læse den. Ved denne research er der fundet 18 artikler af relevans fra februar 2004 til december 2011, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH, hvor de fundne artiklers kilder er noteret sammen med oversvømmelsens lokalitet og årsag. Ved søgningen på hjemmesiden var det ikke muligt at finde ældre artikler end den tidligst fundne fra februar 2004, da hjemmesiden ikke er opdateret med ældre artikler.

3.2.1 Usikkerheder ved metoden

Der er en række usikkerheder forbundet med anvendelse af artikel research som metode til at lokalisere allerede udsatte områder i Aalborg. For det første kan der være fejl i artiklerne. Fejlene kan opstå, hvis journalisten formidler ukorrekte informationer. Dette kan forekomme, hvis journalisten ikke selv oplever oversvømmelsen og derfor skal formulere sine kilders oplysninger. Hvis journalisten for eksempel ikke er kendt i byen, så kan vedkommende ligeledes formidle oversvømmelsens geografiske udbredelse forkert. De interviewede i artiklerne kan ligeledes give forkerte oplysninger. Dette kan eksempelvis forekomme, hvis den interviewede husker forkert eller overdriver. I den forbindelse bliver journalistens valg af interviewperson udslagsgivende, da et forkert valg kan betyde forkerte oplysninger i tilfælde af, at den interviewede ikke sidder inde med de rigtige oplysninger.

Artiklerne kan desuden mangle præcision. Dette gav sig udslag i flere af de fundne artikler, hvor oversvømmelsens udbredelse eksempelvis kun var beskrevet ved navnet på bydelen. I dette tilfælde er det valgt ikke at kortlægge bydelen som udsat for oversvømmelse, da det vurderes at være for upræcist. I andre artikler var kun vejnavnet oplyst, hvorved den præcise lokalitet dermed ikke fremgik. Dette giver stor usikkerhed, hvis der er tale om store veje, hvor topografien ændrer sig betydeligt langs vejen. Herved er det dog valgt at kortlægge hele vejen som oversvømmelsesudsat, hvorfor det endelige kort skal tages med forbehold. Beskrivelsen af lokaliteten kan ligeledes være upræcis, dette gav sig udslag ved artiklen, som beskriver oversvømmelserne i Tornhøjparken, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH. Her angiver navnet ikke, hvorvidt der er tale om vejen Tornhøjparken eller de grønne arealer omkring, som ligeledes kaldes Tornhøjparken.

I søgningen på hjemmesiden af "oversvømmelse Aalborg" er der usikkerhed om, hvorvidt alle relevante artikler fremkommer som søgeresultat. Der kan mangle relevante artikler i søgeresultatet i det tilfælde, at artiklerne ikke indeholder et af de to ord "oversvømmelse" eller "Aalborg". Det kunne for eksempel forekomme, hvis der i nogle artikler anvendes ordet "højvande" frem for "oversvømmelse". I min sortering af relevante artikler kan der ligeledes være en usikkerhed om, hvorvidt kun irrelevante artikler er blevet frasorteret, da der kan opstå fejl undervejs. Videre vil alle oversvømmelsesepisoder i det nævnte tidsrum højst sandsynligt ikke være beskrevet i artikler på Nordjyske.dk, hvorved der har været oversvømmelsesepisoder, som ikke fremgår af søgningen. Disse typer af fejl vil alle resultere i, at min kortlægning vil mangle oversvømmelsesudsatte områder.

At det kun er muligt at gå otte år tilbage i artikelsøgningen, kan tilsvarende betyde, at metoden ikke er repræsentativ nok til at lokalisere alle udsatte områder. Det må derfor formodes, at der har været oversvømmelser tidligere, som har ramt områder, der ikke er repræsenteret i kortlægningen.

På trods af at der er en række usikkerheder forbundet med artikel researchen, er metoden medtaget i projektet, da den giver et billede af hvilke områder, der har været udsat for oversvømmelser i Aalborg. Dataene var tilgængelige, modsat data fra forsikringsselskaber, Falck og ISS, og i forhold til resultatets fokus i projektet vurderedes artikel researchen anvendelig. Det skal dog påpeges, at den endelige kortlægning i projektets problemanalyse (Figur 2, side 11) skal tages med forbehold.

For at validere resultatet af artikel researchen sammenholdes dette med Aalborg Kommunes udpegning af områder, der har været udsat for oversvømmelser i Aalborg (interview med Michael Eilertsen). For yderligere at validere artikel researchen kunne samme research foretages i andre aviser. Dette er fravalgt på grund af projektets fastsatte tidsramme.

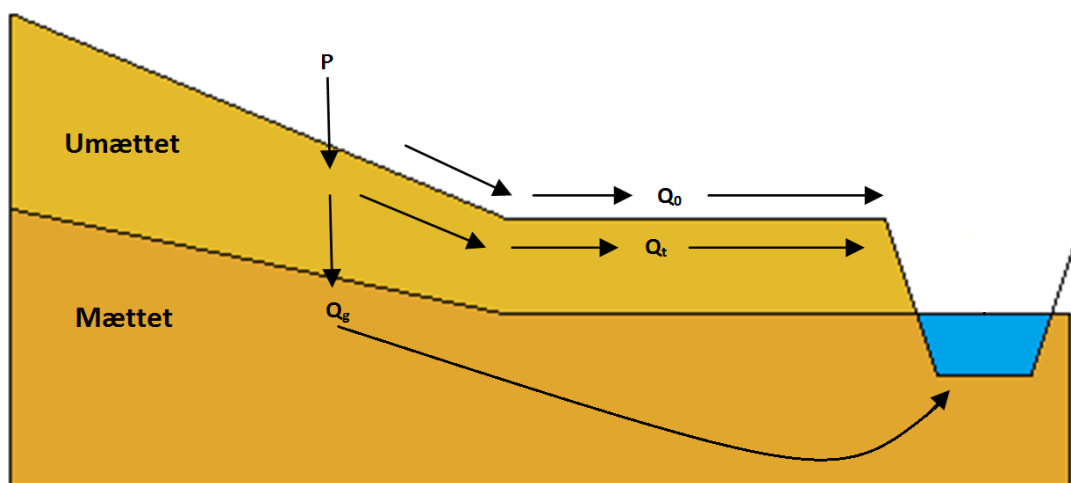
4. AFSTRØMNING OG KLOAKERING

I dette kapitel beskrives urbaniseringens effekt på afstrømningsmønstret samt kloaksystemets opbygning i Aalborg. Dette skal medvirke til en forståelse af, hvorfor oversvømmelser opstår i byer og dermed kunne bidrage til projektets opbygning af GIS-modeller.

Da Aalborg er opdyrket og urbaniseret, får den naturlige afstrømning minimal indflydelse på afstrømningsmønstret. Byen indeholder dog en række parker, græsarealer, villaveje med haver, landbrugsarealer og andre åbne, grønne områder, hvor afstrømningen i mere eller mindre grad forløber naturligt. En beskrivelse af afstrømningsveje i disse områder vurderes derfor relevant og vil kunne bidrage til en forståelse af urbaniseringens effekt på afstrømningsmønstret.

4.1 Afstrømningsveje

Når nedbør falder over terræn bevæger det sig ad forskellige veje og med forskellige hastigheder mod vandløb og hav. Nedbørens forskellige strømningsveje, fra det falder på jordoverfladen, fremgår af Figur 4.



Figur 4: Forskellige strømningsveje: Q_0 er overfladeafstrømning, Q_t er underjordisk gennemstrømning, og Q_g er grundvandsstrømning. Inspireret af (Ward & Robinson, 2000, s. 235).

Når nedbør trænger ned gennem jordoverfladen og bevæger sig i den øvre del af jordprofilet langs jordoverfladen mod vandområderne, så er der tale om underjordisk gennemstrømning (Q_t). Vandet løber her i den umættede zone. Denne afstrømningstype forekommer, da den hydrauliske konduktivitet er større i jordlagene tæt på jordoverfladen end dybere nede i profilet. Ved længere perioder med nedbørshændelser eller i tilfælde med kraftige nedbørsmængder, vil vandet trænge ned i jorden hurtigere end det kan trænge ned i den mættede zone, hvorfor vandet vil løbe i den umættede zone, langs overfladen. (Ward & Robinson, 2000) Gradvist som jorden fyldes med vand, bliver jorden mættet op til overfladen. Dette medfører, at en direkte afstrømning, hvilken består af vand, der både strømmer over og under jordoverfladen, opstår. Denne proces, hvorved jorden gradvist mættes vil først ske i de topografisk, laveste områder, nærmest vandløbene, hvorefter det mættede område udvider sig i jorden længere og længere væk fra vandløbene. (Ward & Robinson, 2000)

Overfladeafstrømning (Q_0) opstår, når oplandet, nærmest vandløbene, er så mættet, at jorden ikke kan kapere den underjordiske afstrømning fra terræn højere oppe i oplandet, hvorved denne underjordiske afstrømning vil trænge op på jordoverfladen. (Hewlett & Hibbert, 1967) Mængden af overfladeafstrømning afhænger af nedbørens intensitet og jordens infiltrationskapacitet. Den største overfladeafstrømning forekommer i områder med stejl hældning og sparsomt plantedække. Topografien og jordprofilet kan medvirke til, at grundvandspejlet hæves under nedbørshændelser eller ved underjordisk afstrømning. Dette medfører, at jordens infiltrationskapacitet falder, hvorfor en øget overfladeafstrømning forekommer. (Ward & Robinson, 2000) Som nedbøren falder, vil infiltrationskapaciteten løbende ændre sig. Ved regnfaldets begyndelse, vil infiltrationskapaciteten være på sit maksimum, hvorefter den vil aftage kraftigt for til sidst at nå et stabilt minimum. Er regnintensiteten mindre end infiltrationskapaciteten, vil der ikke skabes overfladeafstrømning, og vandet vil derfor trænge ned i jorden. Er regnintensiteten derimod større end infiltrationskapaciteten vil der skabes overfladeafstrømning. (Horton, 1933)

I byer adskiller afstrømningsmønsteret sig væsentligt fra afstrømningen i naturen, da jorden i byerne er forseglet med eksempelvis bygninger, veje og parkeringspladser. Her kan nedbøren ikke trænge igennem og dermed langsomt nedsive til grundvandet. I stedet ledes regnvandet via kloaker til renseanlæg eller recipienter.

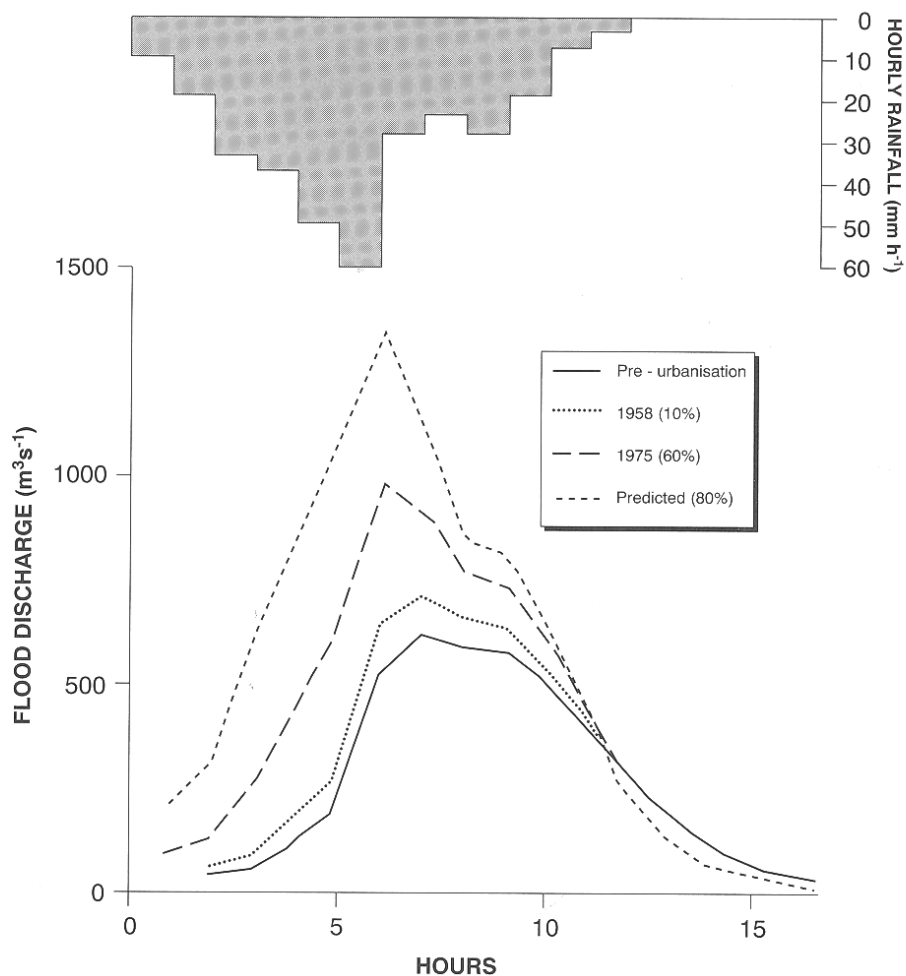
4.2 Urbaniseringens effekt på afstrømningsmønsteret

Urbaniseringen ændrer afstrømningsmønsteret, i og med at permeable, vegeterede landområder erstattes af impermeable overflader kun afbrudt af mindre, grønne områder, hvorved overfladeafstrømning forøges. I stedet for at regnvandet infiltreres ned i jorden, fordampes og bevæger sig med lav hastighed mod grundvandet eller vandløb, vil det løbe hurtigt på overfladen mod vandområderne og lavninger i terrænet. Med belægningen formindskes oplandets mulighed for at opmagasinere nedbøren i jorden, da vandet kun kan trænge ned ved de små, grønne åbninger i byområderne. (Arnell, 2002) Forskellige overfladers uigennemtrængelighed fremgår af Tabel 1.

Overflade	Uigennemtrængelighed (%)
Vandtæt tagoverflade	70-95
Asfaltudlægning i god stand	85-90
Sten, mursten og træ belægning:	
Med tæt cementerede fuger	75-85
Med åbne eller usikre fuger	50-70
Dårlig belægning med åbne fuger	40-50
Makadam veje og stier	25-60
Grusveje og grusstier	15-30
Ikke-asfalterede overflader, såsom jernbaner og ubesatte grunde	10-30
Parker, haver, græsplæner – afhænger af hældning og jordtype	5-25

Tabel 1: Forskellige overfladers uigennemtrængelighed. Fra (Smith & Ward, 1998, s. 82).

Resultatet af urbanisering fremgår tydeligt ved at betragte hydrografer, se eksempelvis Figur 5. Af figuren fremgår det, at regnfaldets toppe kommer hurtigere og er højere i et urbaniseret område end i området før urbaniseringen. (Arnell, 2002)



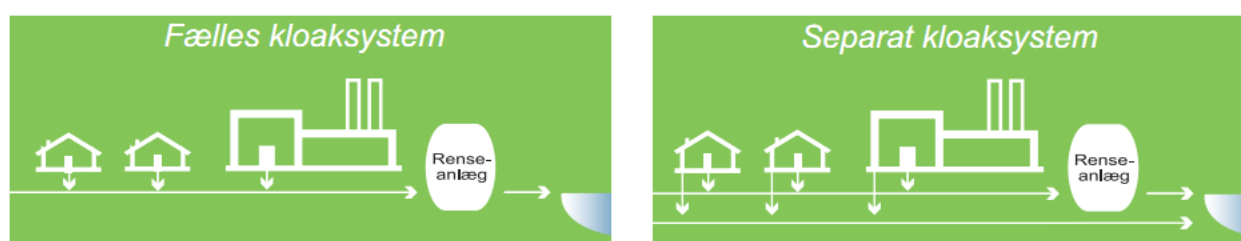
Figur 5: Afstrømning af en nedbørshændelse opstrøms og nedstrøms af et urbant område. Fra (Smith & Ward, 1998, s. 81).

Ved en større overfladeafstrømning vil en større del af regnfaldet ende direkte i vandløbene, hvorfor disse vil indeholde en større procentdel nyfalden regn end i et plantetækket område, hvor den nyfaldne regn opmagasineres i jorden i lang tid inden den til sidst udledes til vandløbene. Dette betyder derfor, at hydrografen vil repræsentere en større del af den nyfaldne regn. Samtidig vil antallet af nedbørshændelser, som skaber forøget afstrømning i vandløbene, vokse, hvorfor hydrografen vil indeholde flere toppe. (Arnell, 2002)

4.3 Kloakering

For at lede regnvandet væk fra byområderne, bygges kloaksystemer. Herved ledes overfladevand hurtigt væk fra veje, bolig- og industrikvarterer til recipienter, som typisk er vandløb, søer eller hav. Denne hurtige bortledning af vand kan få eksempelvis vandløb til at oversvømme de omkringliggende arealer, da den hurtige transport i kloaksystemerne bevirker, at en større mængde vand når hurtigere frem end under naturlige forhold. Dette resulterer i et hurtigere afstrømningsforløb med en højere vandføring. (Davie, 2008) Samtidig er der i byområder en øget import af rent vand til husholdning og industri, hvorfor udledningen af spildevand gennem kloaksystemerne tilsvarende forøges. Vandet ledes direkte til recipienter eller gennemgår en rensning før udledning. (Smith & Ward, 1998)

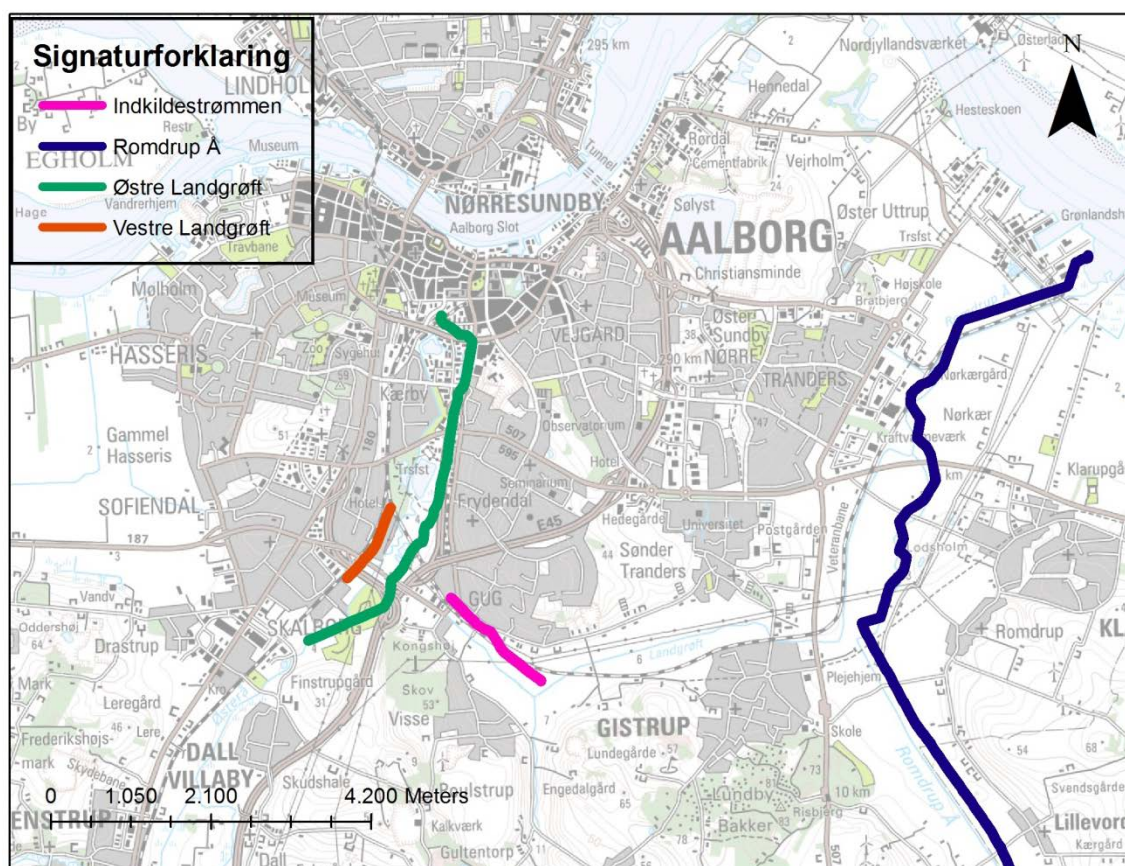
I Aalborg er der to typer kloaksystemer: Fælleskloakering og separatkloakering. Fælleskloakering er en gammel kloakeringstype, hvor regnvand og spildevand ledes til det samme rør, hvorefter det føres videre til renseanlæg. I dele af Aalborg by ledes en del vand ikke til rensningsanlæg men udledes direkte til recipienter via overløbsbygværk. Dette gælder blandt andet flere steder i Øgadekvarteret. Ved rensning ledes vandet i Aalborg enten til Renseanlæg Vest eller Renseanlæg Øst. Her bliver spildevandet og regnvandet rensat og derefter udledt til Limfjorden (Kloak, Aalborg Forsyning). I tilfælde af, at der ikke er plads til spildevandet i kloakrørene, vil det blive udledt til recipienter ved et overløbsbygværk. Derved ledes spildevandet sammen med regnvandet urensat eller kun lettere rensat til vandområderne. Med separatkloakering ledes spildevandet og regnvandet i rør hver for sig. Spildevandet bliver således transporteret til renseanlæggene for sig, mens regnvandet udledes til nærmeste vandområde urensat. (Greve Forsyning) Forskellen på kloakeringssystemerne fremgår af Figur 6.



Figur 6: Forskellen på Fælleskloakering og separatkloakering. Fra (Kloak, Aalborg Forsyning).

I Aalborg er Kommunen i gang med at omlægge kloaksystemet fra fælleskloakering til separatkloakering, da separatkloakering er mere miljøvenlig, grundet en mere effektiv rensning af spildevandet på rensningsanlægget (Forsyningsvirksomhederne, Aalborg Kommune) Det fremgår af BILAG II: OVERSICHT OVER FÆLLES- OG SEPARATKLOAKEREDE OMRÅDER I AALBORG, at det meste af den indre bydel i Aalborg er fælleskloakeret. Dette er Hasseris, Vestbyen, Midtbyen, Øgadekvarteret, Kærby, Vejgaard og Grønlænderkvarteret. Derimod er områderne nær Skalborg, Gug Øst, Øster Sundby og Tornhøj separatkloakeret. (Aalborg Forsyning) Den nedbør, som falder i de fælleskloakerede områder, bliver transporteret til Renseanlæg Øst eller Vest, og bidrager derfor ikke til regnvandsudledningen til Aalborgs vandløb. Kun i situationer med ekstremregn vil regnvandet sammen med spildevandet ledes fra overløbsbygværker til recipienterne i Aalborg.

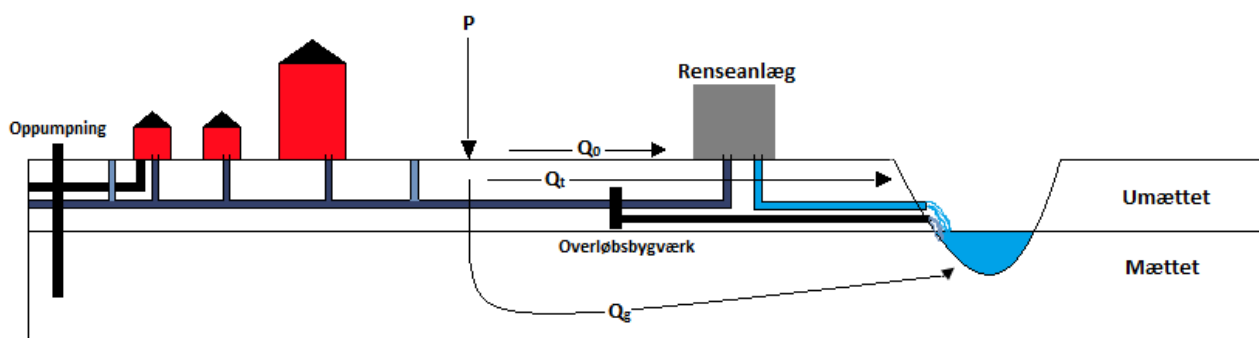
Recipienterne i Aalborg er Limfjorden og Aalborgs mange vandløb, deres placering ses på Figur 7. Limfjorden modtager blandt andet regnvand fra de to renseanlæg, Nørresundby, Midt- og Vestbyen og Østbyen. Vestre Landgrøft, som ligger langs Østerådal, vest herfor, modtager regnvand fra Kærby, Midt- og Vestbyen, Hasseris, Skalborg og City Syd. Østre Landgrøft, som går gennem Østerådal og fortsætter vest forbi Kærby, modtager vand fra Østbyen. Romdrup Å er recipient for regnvand fra Aalborg Øst, herunder Sdr. Tranders, Tornhøj, Øster Uttrup og Gug Øst. Hasseris, Skalborg og City Syd udleder regnvandet til Lergrav/Limfjord, Svandholmgrøften og Gl. Hasseris Grøft. Endelig leverer Gug vand til Indkildestrømmen. (Aalborg Forsyning)



Figur 7: Vandløb i Aalborg, som virker som recipient for separatkloakerede områder i Aalborg. Vandløbskort fra DMU, GEUS: AIS. Baggrundskort: Danmarks topografiske Kortværk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98.

4.4 Afstrømningsmønstret i byer

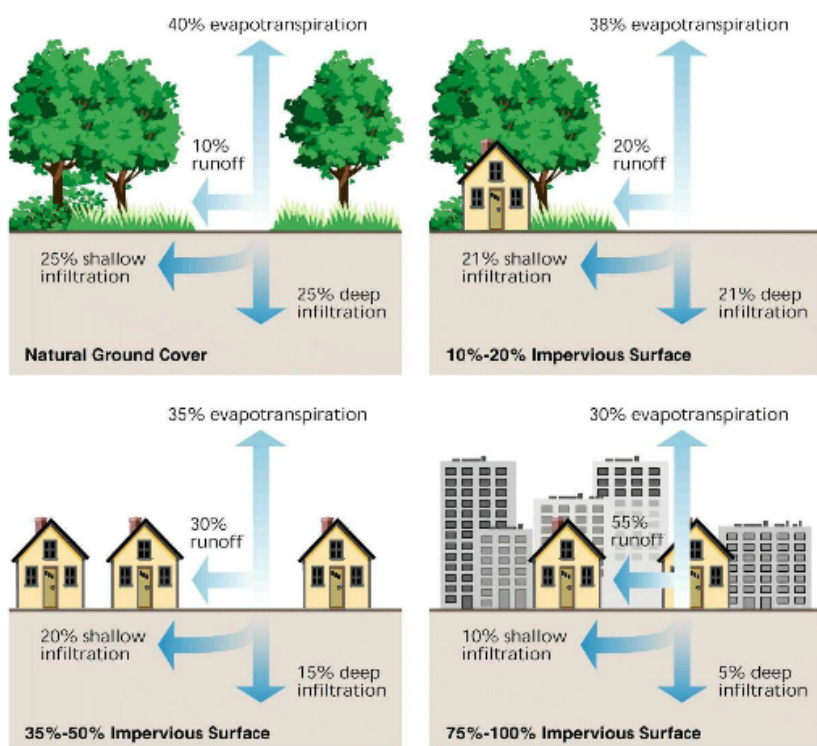
På baggrund af dette kapitel er det nu muligt at skitsere afstrømningsmønstret i byområder og ved sammenligning med afstrømningsmønstret på grønne arealer, jævnfør Figur 4, side 21 kan forskellene opsummeres. Afstrømningsmønstret i byområder ses i Figur 8, hvor systemet er skitseret med fælleskloakering, da det er det nuværende kloakeringssystem i Aalborgs indre bydele.



Figur 8: Afstrømning i byer med fælleskloakering.

Af figuren fremgår det, at afstrømningen i byer, ligesom for grønne arealer, består af overfladeafstrømning, Q_0 , underjordisk gennemstrømning, Q_t , og grundvandsstrømning, Q_g . Derudover er der en underjordisk

strømning via kloakrør, hvor regnvand og spildevand fra veje og bygninger ledes til renseanlæg og efter rensning udledes til recipienter. Ved kapacitetsmangel i kloakledningerne vil regn- og spildevand udledes urensset til recipient ved overløbsbygværket. Desuden sker der en import af oppumpet grundvand til bebyggelsesområderne. Størrelsesordenen på afstrømningerne Q_0 , Q_t og Q_g har ændret sig i forhold til afstrømningen på grønne arealer. Den overfladiske afstrømning er forøget i bysystemet, mens den underjordiske gennemstrømning og grundvandsstrømningen er aftaget. Årsagen hertil er byens forseglingsprocent, som forhindrer regnvandet i at trænge ned i jorden. Dette forårsager endvidere ofte et nedsænket grundvandspejl i byområder. Hvor stor betydning urbanisering har på afstrømningsmønstret og forholdet mellem de forskellige afstrømningstyper fremgår af Figur 9.



Figur 9: Urbaniseringens effekt på vandbalancen. Fra (World Meteorological Organization & Global Water Partnership, 2008, s. 11).

Det ses af figuren, at den overfladiske afstrømning stiger fra 10 % i et plantedækket område til 55 % i et byområde med tæt bebyggelse. Samtidig hermed falder infiltrationen af regnvand til grundvandet fra 25 % til 5 %, og den underjordiske gennemstrømning falder fra 25 % til 10 %.

I dette kapitel er urbaniseringens effekt i forhold til risikoen for oversvømmelser beskrevet. På grund af forsegling og kloakering tvinges afstrømningen til at forløbe på anden vis. Dette bevirker, at vandmængderne i de forskellige afstrømningstyper, især den overfladiske og underjordiske afstrømning, bliver omfordelt. Hermed kan konsekvenserne være, at ophobede vandmængder samles på u hensigtsmæssige arealer, hvilket kan føre til oversvømmelser. Denne viden skal anvendes i projektets opbygning af GIS-modeller til rumlig analyse, hvor den overfladiske afstrømning kortlægges i forhold til forseglingsprocenten, for på den baggrund at kunne bestemme, hvor vandet samler sig i Aalborg. Forud for analysen skal andre årsager til oversvømmelser først behandles, for derved at kunne forklare, hvorfor de allerede udsatte områder i Aalborg udsættes for oversvømmelser.

5. ÅRSAGER TIL OVERSVØMMELSER

Formålet med dette kapitel er at forstå hvilke processer, der forårsager oversvømmelser, for på den baggrund at kunne forklare, hvorfor de *allerede udsatte områder* i Aalborg, blev udsat for oversvømmelser. Dermed skal denne beskrivelse kunne bidrage til projektets GIS-analyser, hvor den indsamlede viden skal anvendes til at kunne vurdere, hvor vandet samler sig, og dermed hvor der er risiko for oversvømmelse i Aalborg by. Kapitlet indledes herunder med en definition på oversvømmelse, hvorefter oversvømmelser fra vandløb og i lavninger beskrives. Dernæst behandles de parametre, som forøger overfladeafstrømning og dermed risikoen for oversvømmelse. Oversvømmelser fra kloaksystemer vil ligeledes behandles, og i den forbindelse beskrives hvilke foranstaltninger, der kan formindske risikoen for oversvømmelse. Afslutningsvist vil det på baggrund af kapitlet samt forudgående kapitler beskrives, hvad årsagerne er til, at de *allerede udsatte områder* i Aalborg blev eller bliver oversvømmet.

Til at definere begrebet oversvømmelse anvendes oversvømmelsesdirektivets definition givet ved følgende:

'flood' means the temporary covering by water of land not normally covered by water. This shall include floods from rivers ... and floods from the sea in coastal areas, and may exclude floods from sewerage systems. (The European Parliament and the Council of the European Union, 2007, s. 288/29)

I projektet er det valgt at fokusere på oversvømmelser grundet nedbørshændelser, og derfor vil fokus fremover lægge på oversvømmelser fra vandløb og i lavninger, hvorfor oversvømmelser fra hav ikke behandles. Da oversvømmelser fra kloaksystemer er et aktuelt problem i Aalborg, bliver denne type oversvømmelse ligeledes behandlet i dette kapitel.

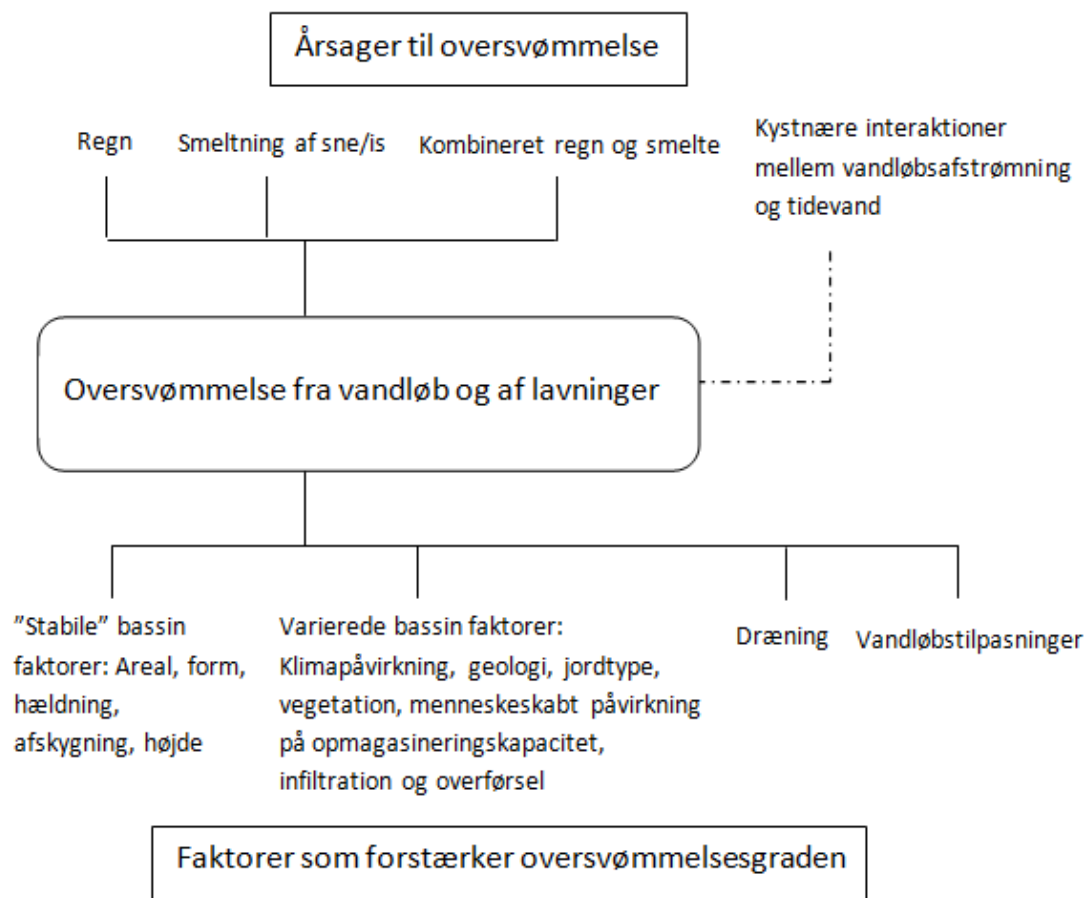
5.1 Oversvømmelser fra vandløb og af lavninger

Oversvømmelse fra vandløb og af lavninger behandles sammen med årsagerne hertil og de forstærkende faktorer i det følgende. I Figur 10 er årsagerne til oversvømmelser fra vandløb og i lavninger opstillet sammen med faktorer, der virker forstærkende på oversvømmelsesgraden.

5.1.1 Oversvømmelse fra vandløb

For oversvømmelser fra vandløb er den hovedsagelige årsag, at der falder mere nedbør end vandløbet kan kapere. I den forbindelse bliver nedbørens intensitet, længde og geografiske udstrækning af betydning. Når der sker oversvømmelse fra vandløb, vil det ofte skyldes, at vandstrømmen overstiger vandløbets kapacitet, hvormed vandløbet går over sine breder, og der sker en vanddækning af flodsletten eller ådalen. Årsagen hertil kan være længerevarende eller adskillige nedbørshændelser, som skaber betingelserne for et hævet grundvandspejl. Ved fortsat nedbør kan grundvandspejlet hæve sig over jordoverfladen, hvorved flodsletten og andre flade områder oversvømmes. (Smith & Ward, 1998)

I urbane områder vil kraftig nedbør kunne forårsage oversvømmelser, da belægning forsegler jorden, hvormed øget overfladeafstrømning opstår. Overfladevandet vil sammen med vand fra kloaksystemer lede regnvandet til vandområderne, hvilket ved kraftige nedbørshændelser vil kunne overbelaste vandløbet, hvormed vandet flyder over og forårsager oversvømmelser. (Smith & Ward, 1998)



Figur 10: Årsager og forstærkende faktorer til oversvømmelser fra vandløb og i lavninger. Inspireret af (Ward & Robinson, 2000, s. 271).

5.1.2 Oversvømmelse af lavninger

Lavninger i terrænet er ofte udsat for oversvømmelse, da både den overjordiske og underjordiske afstrømning vil konvergere mod lavningen. Som vandet når lavningen, vil det først trænge ned i jorden og gradvist skabe mættede lag i jorden. Ved kraftige nedbørshændelser eller længerevarende nedbør vil vandet bevæge sig hurtigere mod lavningen, end det kan nå at sive ned i profilet, hvorved lavningen bliver oversvømmet. Står grundvandspejlet i forvejen højt, vil processen forløbe hurtigere. (Ward & Robinson, 2000)

5.2 Faktorer som forstærker oversvømmelsesgraden

Oversvømmelser opstår ofte lokalt inden for enkelte oplande. En oversvømmelse i et opland er derfor ikke ensbetydende med at opgrænsende oplande tilsvarende er udsat. De enkelte oplande har netop forskellige karakteristika i forhold til form, størrelse og udformning. Vandløbenes udformning, samt vegetations- og jordbundsforhold har ligeledes betydning for, hvorvidt en nedbørshændelse forårsager oversvømmelser. Endelig påvirker menneskeskabte foranstaltninger, at risikoen for oversvømmelse forøges. Derfor behandles oplandets areal og hældning, jordens vandindhold, vandløbets forgreningsmønster, skovrydning, dræning og urbanisering i det følgende.

5.2.1 Oplandets areal, hældning og udformning

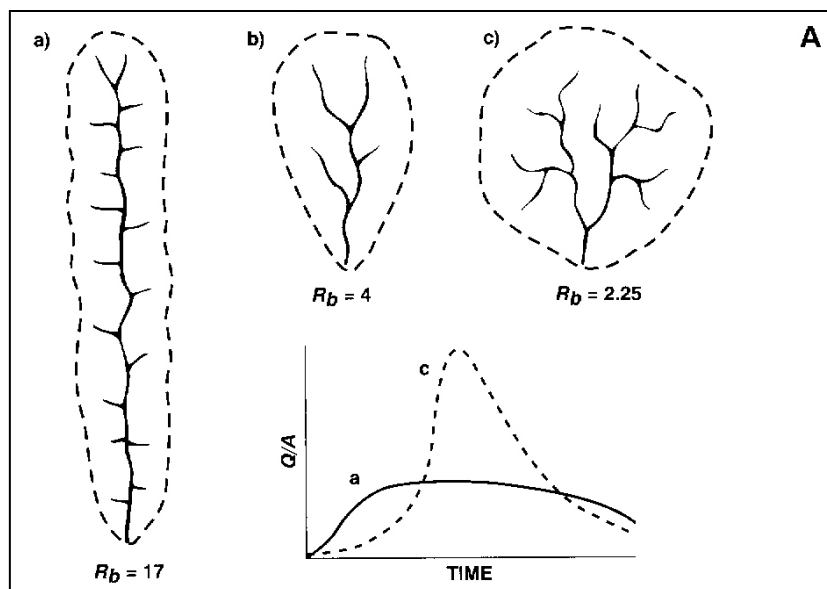
Dannelsen af oversvømmelse i et område i et opland, afhænger af vandføringen i oplandet og dermed af vandføringen opstrøms. Oplandets areal har betydning for en mulig oversvømmelses størrelse i den forstand, at jo større oplandet er, des større vil oversvømmelsen, som dannes i oplandet, være. Det skal dog bemærkes, at hvis der sammenlignes to oplande af forskellig størrelse, som udsættes for samme nedbørshændelser, så vil vandføringen i det største opland være lavere end vandføringen i det mindste opland, i og med at vandet i det største opland skal transporteres længere end i det mindre opland. Dette kan ligeledes ses i det faktum, at vandføringen vokser i størrelse nedstrøms, når den måles absolut (m^3/s), hvorimod den aftager i størrelse, hvis den udtrykkes som en specifik udledning ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$). Dermed kan en nedbørshændelse i et lille opland godt forårsage oversvømmelse, mens samme nedbørshændelse i det store opland, ikke ville kunne forårsage oversvømmelse. (Ward & Robinson, 2000)

Hældningen har betydning for, hvor hurtigt vandet føres til vandområderne. Jo stejlere hældningen er, des hurtigere vil nedbøren føres til vandområderne. Dette giver sig også udslag i hydrografen, her vil hydrografens top netop vise sig tidligere ved stejle oplande. (Arnell, 2002)

Oplandets udformning har ligeledes betydning for oplandets oversvømmelsesrisiko. I et langt og tyndt opland vil akkumuleringen af vand nedstrøms forløbe langsomt, da vandet skal strømme hertil i stadig større afstande. Modsat vil vandet i et bredt og rundt opland strømme til udløbet hurtigt, hvorved hydrografens top forefalder tidligt. Dette er stærkt forbundet med vandløbets forgreningsmønster. (Arnell, 2002)

5.2.2 Vandløbets forgreningsmønster

Vandløbets forgrening i oplandet har tilsvarende indflydelse på, hvorvidt der opstår oversvømmelse i et opland. Her vil oversvømmelsen kunne opstå ved vandløbets udløb, hvis vandløbet tilføres ad forskellige veje, hvorved vandtilførslen kommer på samme tid, jævnfør c) i Figur 11.



Figur 11: Forholdet mellem bassinform, forgrening og afstrømningstoppe. Fra (Smith & Ward, 1998, s. 13)

Hvis forgreningsmønsteret derimod har udseende som a) i Figur 11, vil der, grundet forsinkelse på vandføringen med afstanden til udledningen, ikke ske en lige så stor ophobning af vand til udledningen på samme tid. (Ward & Robinson, 2000) Dermed bliver tætheden i vandløbsnetværket af betydning for, om der sker en akkumulation af vand nedstrøms. Især forholdene for hovedvandløbet har betydning, således at et kort hovedvandløb, som i (b) i Figur 11, med en stejl hældning vil skabe hurtig afstrømning og dermed større risiko for oversvømmelser. (Arnell, 2002)

5.2.3 Jordens vandindhold

En nedbørshændelse vil udgøre større risiko for oversvømmelse, såfremt der forud for hændelsen er faldet regn. Herved er de øvre jordlag mættede med vand, og en efterfølgende filtrering af den nyfaldne regn og udskiftning af ældre regn i jorden vil forløbe langsommere. Derfor vil en sådan nedbørshændelse ramme hårdere, hvis der forud for denne har været flere regnfald. Videre vil jordens evne til at opmagasinere vand have indflydelse, således at en lav opmagasinerings evne, hvilken kan skyldes, at impermeable lag eller at grundvandsspejlet ligger tæt på jordoverfladen, forårsager hurtige og intensive oversvømmelser. Ligeledes vil en lav infiltrering i jorden, hvilken blandt andet afhænger af jordens mætningsgrad og evne til at overføre vandet, være medvirkende faktor til forøget overflade afstrømning, og dermed forårsagelsen af oversvømmelser. (Ward & Robinson, 2000)

5.2.4 Skovrydning

Udstrækning af områder med plantedækning eller træer har vist at have stor indflydelse på, om oversvømmelser opstår. Træer har den egenskab, at de opfanger nedbøren, før den rammer jordoverfladen, hvorved der trænger mindre vand ned i jorden. Dette bevirker, at jordens fugtighed under skovbelagte områder er mindre end ved eksempelvis opgrænsende græsarealer. Desuden er de øverste jordlag i skove bedre til at absorbere vand, samtidig med at infiltrationshastigheden ofte er større. Dette bevirker alt i alt, at der i skovområder er mindre overfladisk afstrømning og underjordisk gennemstrømning og deraf mindre udledning til vandområderne. Skovrydning virker derfor som forstærkende faktor for forekomsten af oversvømmelser. (Davie, 2008)

5.2.5 Dræning

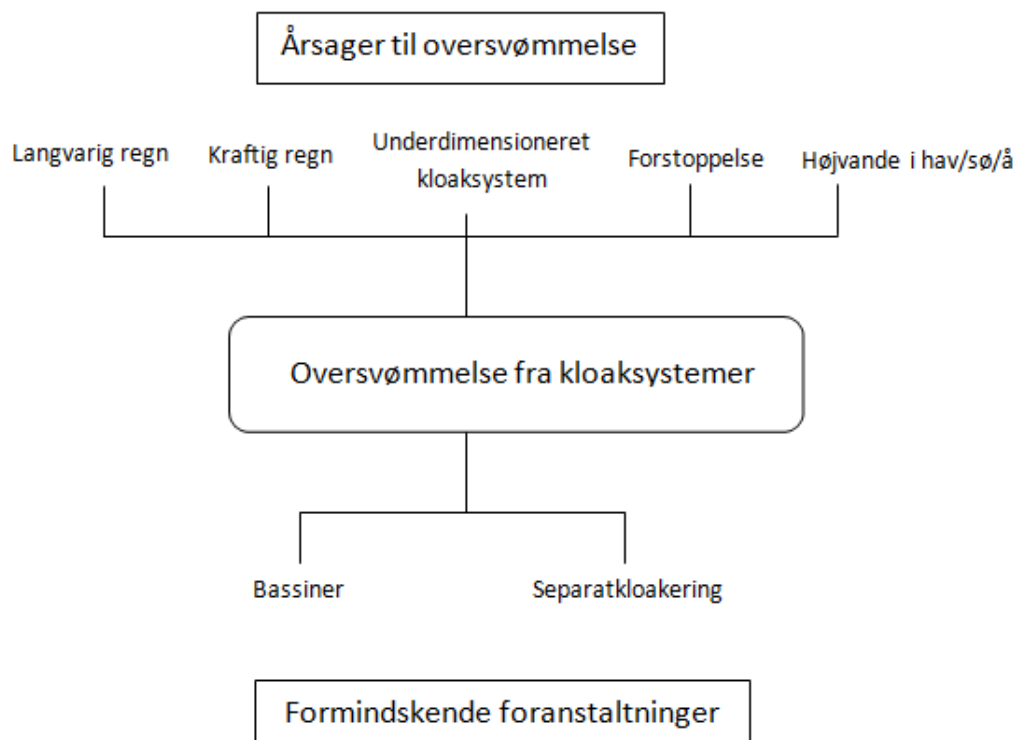
Ved dræning af landbrugsarealer fjernes det overflødige vand - det som planterne ikke har brug for, og derefter ledes det ud i vandløbene. Der finder derfor en mindre filtrering og opmagasinerings af vand sted i drænede områder samtidig med, at overfladeafstrømning og underjordisk gennemstrømning ledes hurtigt ud i vandområderne. Denne hurtige udledning, modsat den langsomme underjordiske afstrømning, som finder sted i naturen, fører til oversvømmelser af vandløbet, da vandet netop tilføres med større hastighed, end vandløbet kan nå at lede vandet til havet. (Davie, 2008)

5.2.6 Urbanisering

Som behandlet tidligere bevirker urbanisering en større overfladeafstrømning og deraf en hurtigere udledning af vand til vandområderne end under naturlige forhold. Sammen med en afledning til recipienterne fra kloaksystemet kan det udledte vand give kapacitetsproblemer i recipienter, hvorved vandstanden stiger og omkringliggende arealer oversvømmes.

5.3 Oversvømmelse fra afløbssystemer

I Figur 12 er årsagerne til oversvømmelse af afløbssystemer opstillet sammen med foranstaltninger, som kan formindske risikoen for oversvømmelser.



Figur 12: Årsager til oversvømmelser fra kloaksystemer og formindskende foranstaltninger.

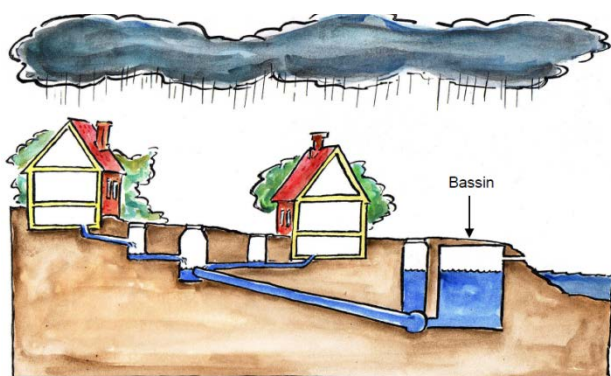
Det fremgår af Figur 12, at der er flere årsager til, at oversvømmelser fra kloaksystemer opstår. For det første kan nedbørshændelser forårsage oversvømmelser fra kloakker. Når der falder store regnmængder får det anlagte afløbssystem betydning for miljø og risikoen for oversvømmelser. Falder der mere vand end afløbssystemet kan kapere, vil kloakvandet presses op på overfladen gennem afløbssystemet, hvor oversvømmelse af huse og kældre kan finde sted. I disse situationer skaber fælleskloakering miljømæssige problemer, da spildevandet netop kommer op til overfladen og kan forurene vandmiljøet, kældre, huse med videre. En sådan opstuvning af kloakvandet finder sted ved længerevarende og kraftige nedbørshændelser. Ved længerevarende nedbørshændelser kan det separate kloaksystem endvidere forårsage kapacitetsproblemer i vandløbene. Da regnvandet i det separate kloaksystem bliver ledt til nærmeste vandløb eller til Limfjorden, vil den hurtige vandtilførsel ved vedvarende regnfald skabe oversvømmelser. (Greve Forsyning)

Efterhånden som byer vokser, kan det underliggende afløbssystem blive underdimensioneret i forhold til at kapere de voksende nedbørsmængder. I takt med byfornyelse udledes der større spildevandsmængder, samtidig med at jorden forsegles i form af veje og bygninger, hvorved større regnvandsmængder skal bortledes via afløbssystemet. En voksende industrisektor medfører ligeledes større spildevandsudledning. Når kloaksystemet er underdimensioneret vil regn- og spildevandet i det fælleskloakerede system i stedet stuve op til overfladen og oversvømme kældre og lavtliggende områder. (Greve Forsyning)

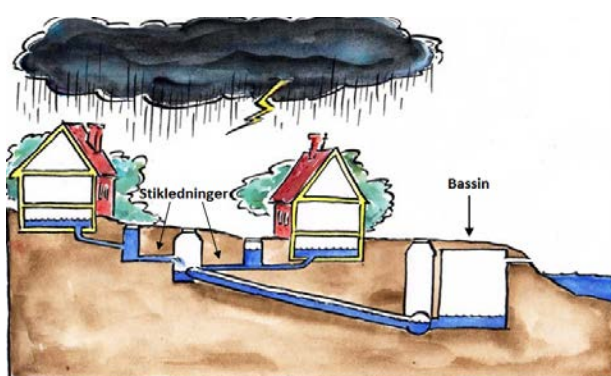
Ved højvande i hav, søer eller vandløb kan der ske tilbageløb i afløbssystemet, hvorved vandet kan trænge op i kældre og forårsage oversvømmelser. Blokering i stikledninger eller hovedledninger er ligeledes en årsag til oversvømmelser fra kloaksystemer, men da dette ikke afhænger af nedbørsmængder, vil denne type ikke behandles yderligere. (Greve Forsyning)

For at undgå oversvømmelser i byområder bygges underjordiske bassiner i afløbssystemet. Et bassin kan siges at være en opbevaringstank placeret under jorden, hvor vandet i afløbssystemet ledes til, jævnfør Figur 13. Derved kan det undgås, at spildevandet ved fællessystemerne ledes urensset til recipienter ved overløbsbygværker, eller at afløbsrørene fyldes, hvorved der ikke kan trænge mere vand ned. Er der tale om separatkloakering, kan bassinerne være åbne op til overfladen og anlagt som søer eller kanaler. (Greve Forsyning)

Når der falder kraftige nedbørshændelser kan der opstå den situation, at spildevandet og regnvandet i fælleskloakeringssystemet ikke ledes hurtigt nok videre til bassinet. Hvis tilførslen af vand til kloakrørene er større end afledningen af vand fra stikledninger og de mindste hovedledninger, så vil vandet kunne trænge op på overfladen og forårsage oversvømmelser. Situationen er illustreret på Figur 14.



Figur 13: Bassin i fælles kloaksystem. Fra (Greve Forsyning).



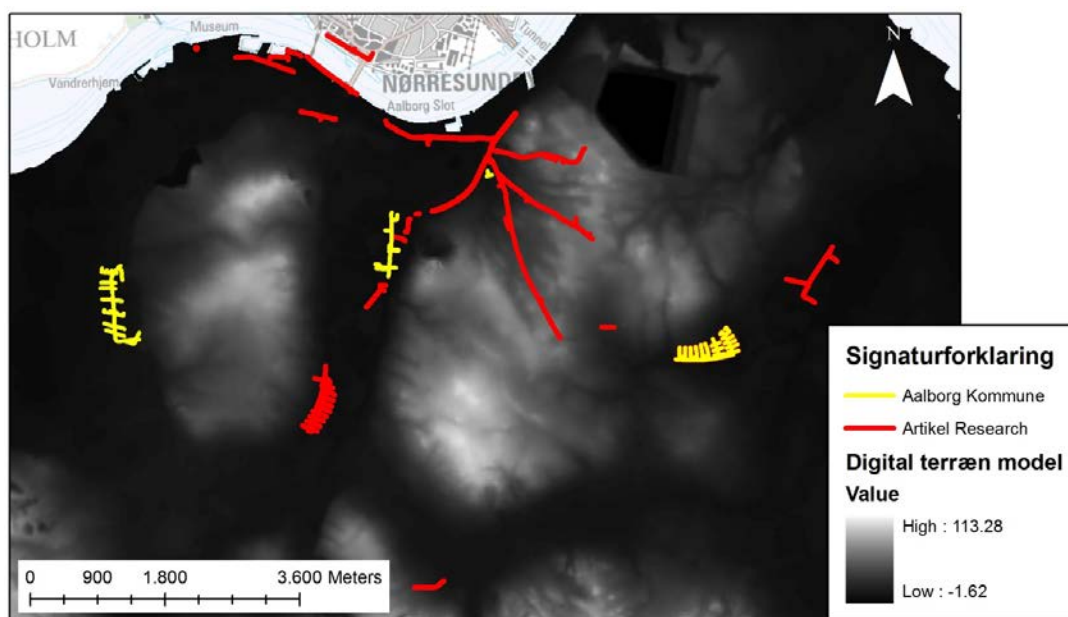
Figur 14: Oversvømmelse ved kraftig nedbør. Fra (Greve Forsyning).

Ovenstående figurer illustrerer fælles kloaksystemet, hvor spildevand og regnvandet netop ledes til samme rørsystem. I områder, hvor der er separatkloakeret, vil der ikke være risiko for oversvømmelse af kældre. Derimod kan der ved separatkloakering ske opstemninger af regnvandet på veje og anden forsegling, hvorved lavninger i terrænet kan blive oversvømmet. (Greve Forsyning)

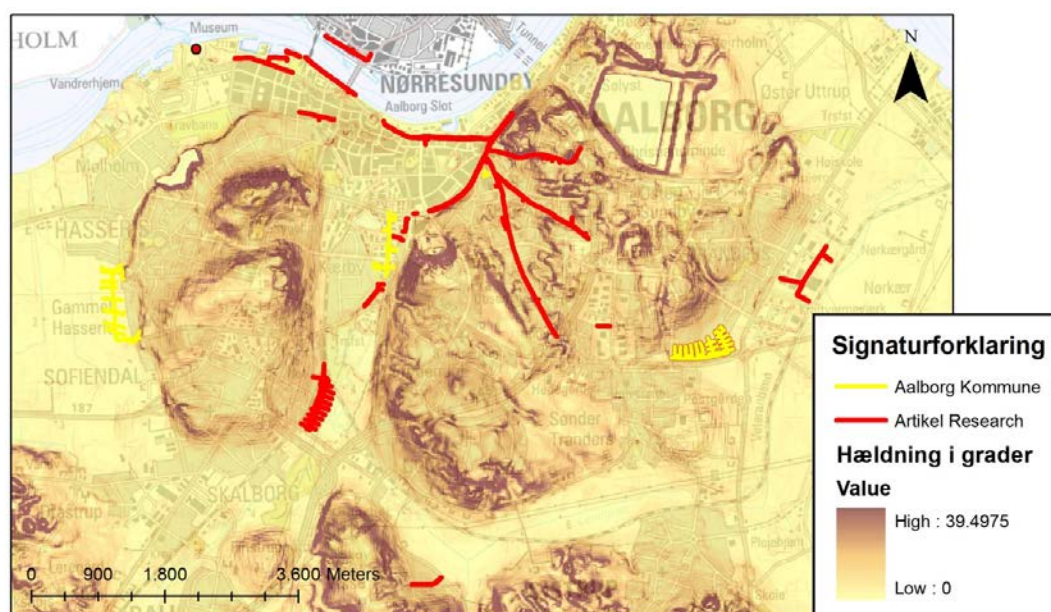
Omlægningen af kloaksystemet fra fælleskloakering til separatkloakering kan både betragtes som en formildende og forstærkende foranstaltning på risikoen for oversvømmelser. Omlægningen er formildende idet oversvømmelse af kældre undgås, da spildevandet ved separatkloakering ledes separat til rensesanlæggene, mens regnvandet ledes separat til recipienter. Omvendt skaber separatkloakering forhøjet pres på recipienter, da forøgede regnmængder udledes hurtigere hertil, frem for ved fælleskloakering at blive bortledt til rensesanlæggene. (Greve Forsyning)

5.4 Årsager til oversvømmelser i Aalborg

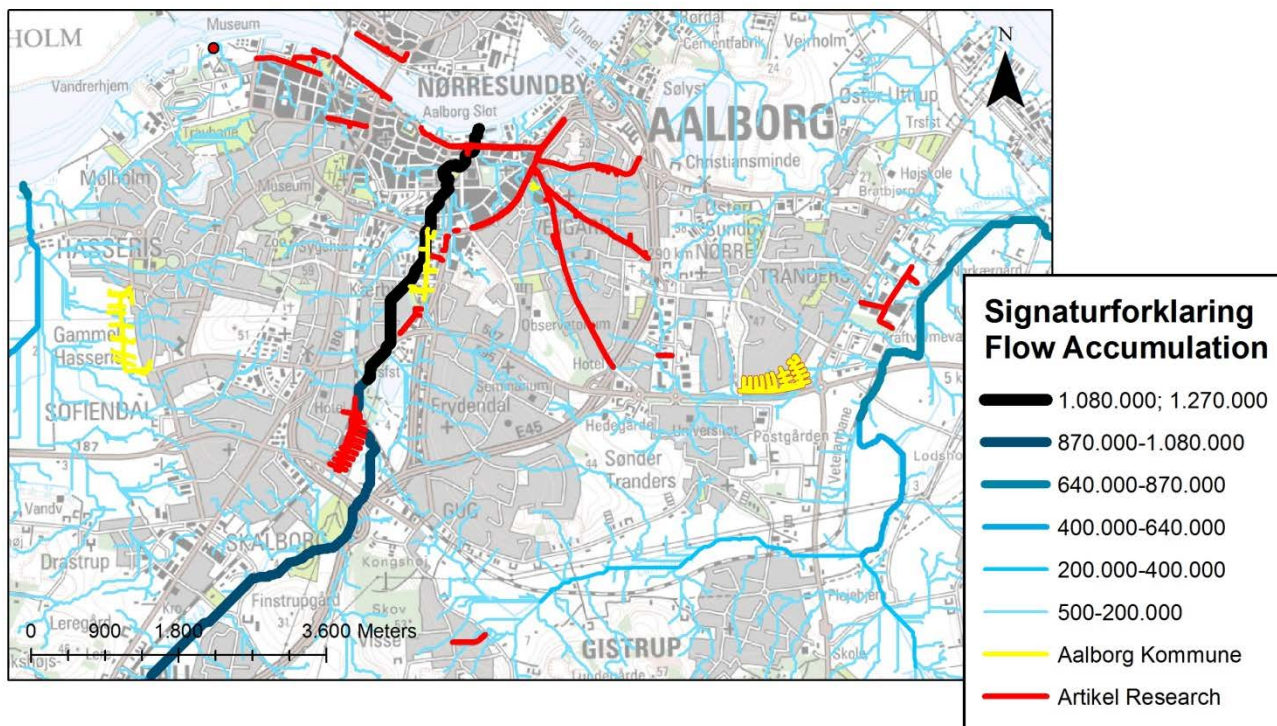
På baggrund af ovenstående samt viden indsamlet i udarbejdelsen af forudgående kapitler er det nu muligt at forklare hvorfor *allerede udsatte områder*, blev eller bliver oversvømmet. Foruden anvendelse af litteratur og fundne artikler i den udarbejdede artikel research, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH, undersøges topografi og vandløbenes strømningsmønstre via ArcGIS. Højdemodellen, hældningerne og vandløbenes strømningsmønstre sammen med de *allerede udsatte områder* er kortlagt i henholdsvis Figur 15, Figur 16 og Figur 17.



Figur 15: Den digitale terrænmodel og de *allerede udsatte områder* i Aalborg fundet ved artikel research (rød) og interview (gul). Baggrundskort: Danmarks Topografiske Kortværk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98.

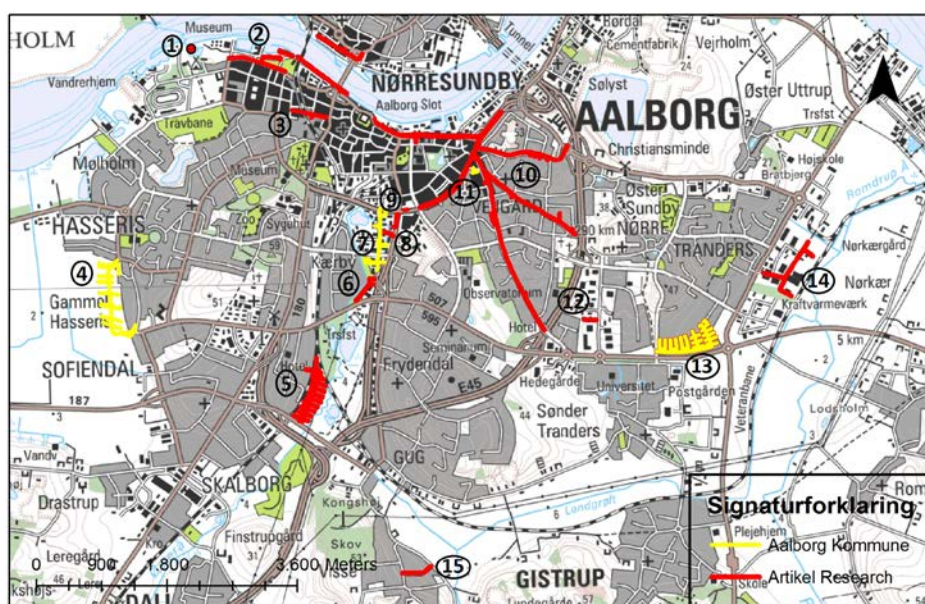


Figur 16: Hældningen og de *allerede udsatte områder* i Aalborg fundet ved artikel research (rød) og interview (gul). Hældningen er fundet ved Spatial Analyst værktøjet Slope ved brug af den digitale terrænmodel. Baggrundskort: Danmarks Topografiske Kortværk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98.



Figur 17: De største vandløbs strømningsveje og de allerede udsatte områder i Aalborg fundet ved artikel research (rød) og interview (gul). Strømningsvejene er fundet ved Spatial Analyst værktøjet Flow Accumulation ved brug af den digitale terrænmodel, hvor tykkelse og farve indikerer, hvor mange celler der strømmer til vandløbet fra arealer opstrøms. Dvs. jo tykkere og mørkere i farven vandløbet er, des mere vand modtager vandløbet fra arealer opstrøms. Baggrundskort: Danmarks Topografiske Kortværk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98.

For en orientering om de allerede udsatte områders placering i Aalborg er Figur 18 indsat.



Figur 18: Lokalisering af allerede udsatte områder (jf. Michael Eilertsen fra Aalborg Kommune (gul) og ved artikel research af Nordjyske.dk (rød). Nr. angivelse: 1) Strandparken Camping 2) Havneområderne: Mellem Broerne, Vestre Havnepromenade, Vestre Bådehavn, Aalborg Roklub, Nyhavnsgade, Peder Skrams Gade og Søsportsvej 3) Reberbansgade 4) Hasseris Enge-området

5) Engen og Ådalen 6) Ålykke 7) Håndværkervej 8) Nålemagervej 9) Kildely 10) Vejgaard området: Nørre Tranders Vej, Øster Sundby Vej, Hadsundvej og Østre Alle 11) Vejgaard Torv 12) Vardevej 13) Tornhøjparken 14) Svendborgvej 15) Ladegårdsvej. Kortdata: Danmarks Topografiske Kortværk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98. Dansk Adresse- og Vejdatabase: Ophavsrettigheder: DAV. Beregnede adressekoordinater: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98.

En beskrivelse af, hvorfor områderne langs havnen oversvømmes (nr. 1 og nr. 2), vil ikke medtages her, da årsagen ikke skal findes i nedbørshændelser men derimod storm, som beskrevet tidligere i kandidatafhandlingen.

Reberbansgade (nr. 3) oversvømmes i en viadukt under jernbanen, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH. Dette er ikke muligt at aflæse af Figur 15 og Figur 16, muligvis fordi kortene ikke er detaljerede nok. Det ses derimod at området er placeret lavt i forhold til området syd for Reberbansgade.

For Hasseris Enge (nr. 4), som blev udpeget af Michael Eilertsen, afdelingsleder for vandmiljøafdelingen ved Aalborg Kommune, haves ingen informationer om, hvad årsagerne hertil kan være, udover store nedbørshændelser. Det ses af Figur 15, at området er lavt placeret i forhold til området vest herfor, hvilket Figur 16 ligeledes illustrerer, da hældningerne her er store. Dermed vil afstrømningen fra dette område forløbe med større hastighed. Af Figur 17 ses det, at tre vandløb vest for området forgrener sig til et lige før Hasseris Enge. Samlet set kan strømningsmønsteret og hældningen dermed skabe en ophobning af vand i dette område.

Flyttes blikket øst over kortene ses det udsatte område ved Østerådalen; kolonihaveforeningerne Engen og Ådalen (nr. 5). Det fremgår her af Figur 15, Figur 16 og Figur 17, at området er lavt placeret, fladt, placeret vest for et område med stejle hældninger og tæt på et område af Øster Å, hvor åen modtager vand fra 870.000 til 1.060.000 celler fra arealer opstrøms (dvs. 8700 til 10.600 hektar jord). I Øster Å er der i forvejen kapacitetsproblemer på grund af et stort opland til et underdimensioneret vandløb (Aalborg Byråd, 2009). Øster Å modtager blandt andet vand fra City Syd og Svenstrup og med en stigende byfornyelse og vejanlægning, skaber forseglingen en forhøjet tilstrømning til åen (Aalborg Byråd, 2009). På baggrund af disse oplysninger formodes det derfor, at årsagen til oversvømmelserne skal findes i, at åen går over sine breder ved stigende tilførsel af regnvand fra oplandet til åen. Dette er også dokumenteret i artikler fra Nordjyske, se BILAG I: ARTIKEL RESEARCH. Beskrivelsen heraf kan videreføres til områderne nord herfor i Kærby, hvor haveselskabet Ålykke (nr. 6), Håndværkervej (nr. 7), Nålemagervej (nr. 8) og kolonihaveforeningen Kildely (nr. 9) er blevet oversvømmet. Her modtager Øster Å vand fra 1.060.000 til 1.270.000 celler fra arealer opstrøms (dvs. 10.600 til 12.700 hektar), jævnfør Figur 17. Desuden er området lavt placeret og med stejle hældninger øst for.

For området omkring og ved Vejgaard Torv (nr. 10 og 11) skyldtes oversvømmelserne underdimensioneret kloaksystemer, hvilket beskrives i avisartiklerne fra Nordjyske, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH. Af Figur 16 og Figur 17 fremgår det, at området er henholdsvis bakket og at strømningsmønsteret har form som c) i Figur 11, side 29. Disse faktorer medfører, sammen med en høj forseglingsprocent, at en hydrograf af afstrømningen vil vise høje toppe, som falder tidligt.

For områderne i Aalborg Øst ved Vardevej (nr. 12) og Tornhøjparken (nr. 13) ses det af Figur 15, at begge områder er placeret lavt i forhold til omkringliggende områder. For begge områder er hældningen lav, og ved Tornhøjparken ses der store hældninger nord for området. Af artiklen i Nordjyske, hvorfra Vardevej er udpeget, skyldes årsagen, at en nærliggende sø går over sine breder. For Tornhøjparken indikerer kortene,

at oversvømmelserne opstår grundet forøget tilstrømning til området fra nord på grund af hældningen og forseglingsprocenten i dette område.

Ved at bevæge blikket længere mod øst ses det udpegede område Svendborgvej (nr. 14). Af Figur 16 ses det, at området er fladt, og Figur 17 afslører, at Romdrup Å, som modtager vand fra 640.000 til 870.000 celler opstrøms, er placeret tæt på, øst for vejen. Årsagen kan derfor være, at åen går over sine breder.

Nederst på kortene ses den oversvømmede vej Ladegårdsvej (nr. 15). I artiklen fra Nordjyske skal årsagen findes i et forhøjet grundvandsspejl, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH. Af Figur 15 ses det, at området er placeret lavt i forhold til området øst herfor og Figur 16 viser, at områderne syd og vest for vejen har høje hældninger. Dette sammen med en høj forseglingsprocent og det pågældende strømningsmønster tyder på, at meget af vandet fra Visse afledes gennem Ladegårdsvej.

På baggrund af den opnåede viden om årsagerne til oversvømmelserne i de udpegede områder er det nu muligt at udvælge metoder til kortlægning af oversvømmelsestruede områder i i ArcGIS. Dette behandles i det følgende kapitel.

6. GIS-MODELLER TIL RUMLIG ANALYSE

I dette kapitel redegøres der for projektets GIS-modeller til rumlig analyse, herunder beskrives det brugte værktøj i ArcGIS og modellerne opstilles via Modelbuilder. Sideløbende hermed redegøres der for de valg, der er gjort undervejs. Derudover behandles teorien bag de forskellige modeller, herunder wetness index og udførelsen af værktøjerne Euclidean Allocation og Cost Distance. Da det er målet med kandidatafhandlingen, at den skal kunne anvendes i andre byer til at lokalisere oversvømmelsestruede områder, vil beskrivelsen af modellernes opbygning få stort fokus, og fremgangsmåden beskrives derfor i detaljer.

Ud fra forudgående analyse af, hvorfor oversvømmelser i Aalborg opstår, vælges det at udarbejde tre modeller til lokalisering af oversvømmelsestruede områder. Det er blevet afklaret, at oversvømmelser i Aalborg blandt andet opstår på grund af, at nogle områder er placeret lavt i forhold til omkringliggende områder. Derfor vælges det at kortlægge lavninger terrænet. Da hældningen og vandløbenes strømningsmønstre har betydning for, hvilke områder der oversvømmes, anvendes en metode til kortlægning af wetness index, hvori det yderligere er muligt at inkorporere forseglingsprocenten. Det blev desuden afklaret, at årsagerne til oversvømmelser i Aalborg skal findes i, at større vandløb går over deres breder. Dette var tilfældet for Øster Å og muligvis også for Romdrup Å og Hasseris Å (se vandløbenes placering i BILAG III: PLACERING I AALBORG), hvorfor der udføres en undersøgelse af vandløbenes udbredelse ved vandstandsstigninger. I udførelsen heraf bliver der taget højde for diger og andre topografiske toppe, som kan bremse vandets udbredelse.

6.1 Digital terrænmodel

I projektets GIS-analyser er modellerne udarbejdet med udgangspunkt i en *digital terrænmodel*, hvor højdeinformationen ligger i 1,6 meter grid. Denne har en nøjagtighed på 15 centimeter. Den digitale terrænmodel er fremstillet ved laserscanning fra fly, og afbilder det grundlæggende terræn uden bygninger, skove og så videre. Modellen repræsenteres af punkter (X,Y) i et koordinatsystem, hvilke angiver lokaliteten i landskabet, og en Z-værdi som angiver højden over havniveau. (Miljøministeriet) I modellering af lavninger og vandudbredelse fra vandløb anvendes denne højdemodel, mens en generaliseret udgave af Danmarks højdemodel med 10 meter grid anvendes til modellering af wetness index. Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98.

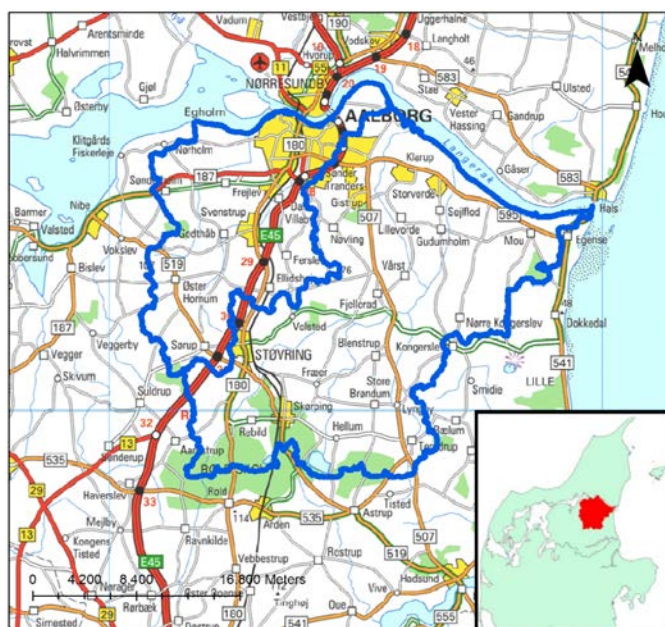
6.2 Anvendte baggrundskort

I visualiseringen af modellernes resultater, er anvendt et landsdækkende, topografisk kort i målestoksforholdet 1:100.000. Kortet er fremstillet ud fra de informationer, der fandtes i de topografiske databaser i 2009 suppleret med informationer om vejnettet fra 2011. Efterfølgende er kortet generaliseret, hvorved mindre detaljer udelades. I kortet er arealtyper som lav bebyggelse, industri, skoler og møller visualiseret med farver eller signaturer. (Kort & Matrikelstyrelsen) Kortet er valgt som baggrundskort, da det visualiserer bydele, bebyggelse, infrastruktur samt grønne områder i Aalborg, hvilket vurderes af betydning for oversvømmelsers lokalitet i et byplanmæssigt perspektiv.

Ligeledes er et landsdækkende, topografisk kort i målestoksforholdet 1:500.000 anvendt ved visualisering af projektets anvendte oplande. Heri er primært byer og større veje visualiseret. Kortet ajourføres årligt på grundlag af trafikale informationer og informationer fra vejmyndighederne. (Kort & Matrikelstyrelsen) Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G24-98.

6.3 Udklip af højdemodellen

For at optimere beregningshastigheden i ArcGIS er det valgt at udklippe højdemodellen efter de topografiske oplande, som dækker Aalborg by. Den digitale terrænmodel udklippes efter oplandene, da vandløb og strømningsretninger bestemmes i de efterfølgende modeller. Fremgangsmåden for udklippet ses i BILAG IV: UDKLIP AF HØJDEMODEL. Det udklippede område fremgår af Figur 19, hvoraf det ses, at de oplande, som Aalborg er en del af, strækker sig langt ud over byens grænser og inddrager Skørping i syd, Mou i øst og Øster Hornum i vest. De modeller, som udføres i denne kandidatafhandling, er således modelleret ud fra dette område.

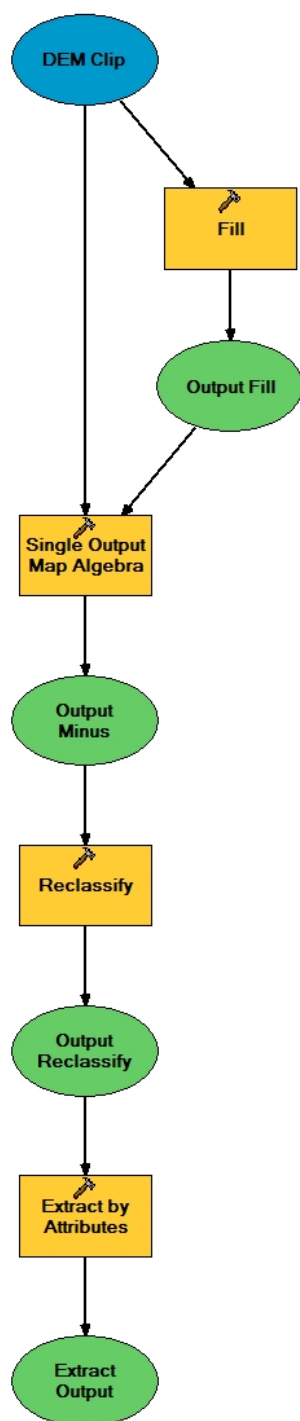


Figur 19: Udstrækningen af den udklippede højdemodel. Lille kort: Top10dk: Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98.

6.4 Lokalisering af lavninger

Når nedbør falder over terræn og strømmer som overfladevand, vil vandet løbe mod de laveste punkter i terrænet. I terrænets lavninger vil vandet således konvergere, og derved opstår en mulighed for at området kan oversvømmes. På baggrund heraf vurderes det relevant at lokalisere lavninger i terrænet. I ArcGIS er det muligt at lokalisere lavninger ved brug af Spatial Analyst værktøjet Fill, se en beskrivelse af værktøjet Fill i BILAG IV: UDKLIP AF HØJDEMODEL.

Af Figur 20, som illustrerer fremgangsmåden for lokalisering af lavninger, ses det, at der er taget udgangspunkt i den udklippede højdemodel med 1,6 meter grid. Ved at bruge Spatial Analyst værktøjet Fill herpå, skabes et rasterlag, hvor alle huller i terrænet er fyldte og angivet efter antal meters dybde. Herefter benyttes Spatial Analyst værktøjet Single Output Map Algebra, hvor følgende udtryk indskrives:



Figur 20: Modelbuilder af lokalisering af lavninger.

$$Output = (DEM\ Klip) - (fyldt\ DEM).$$

Derved fremkommer et output, hvor lavninger er lokaliseret og angivet i meters dybde i forhold til omkringliggende arealer. Altså er *Output* i ligningen ovenover angivet ved lavningens dybde i meter. Det vælges at trække den fyldte højdemodel fra den udklippede højdemodel, da *Output* derved giver negative værdier, hvilket illustrerer, at der er tale om huller i terrænet. Det vælges efterfølgende at omklassificere outputtet og dernæst uddrage lavningerne ved Spatial Analyst værktøjet Extract by Attributes. Hvis den afsluttende uddragning ikke udføres, vil de områder, hvor $(DEM\ Klip) - (fyldt\ DEM) = 0$, være repræsenteret ved en farve i ArcGIS, hvorved det ikke er muligt at se lavningernes placering i byen ved brug af et topografisk baggrundskort.

Når værktøjet Fill anvendes, er det muligt at vælge en Z-værdi, hvorved det kan udspecificeres, hvilke lavninger der skal fyldes efter lavningernes dybde i meter. Ved ikke at vælge en Z-værdi fyldes alle huller uanset dybde. Det er i modelleringen valgt ikke at specificere en Z-værdi, da alle lavninger i terrænet uanset dybde vurderes som værende i risiko for at blive oversvømmet.

6.5 Wetness index

Wetness index er et udtryk for jordens fugtindhold og giver dermed en indikation af, hvor tæt grundvandspejlet er placeret i forhold til jordoverfladen i et område (Grabs, Seibert, Bishop, & Laudon, 2009).

Wetness index er et anerkendt udtryk, som benyttes i mange forskellige sammenhænge. En af disse er i forbindelse med lokalisering af oversvømmelsestruede områder, da indekset beskriver hvilke områder i landskabet nedbøren strømmer til. Med udgangspunkt i den antagelse, at jordens fugtindhold afhænger af topografien, er wetness index defineret som

$$w = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right).$$

Her angiver α , for hvert et punkt i landskabet, hvor stor tilstrømningen til punktet er fra ovenover placeret områder inden for samme opland. I ArcGIS kan α bestemmes via Spatial Analyst værktøjet Flow Accumulation, som er beskrevet nedenunder. β angiver den lokale hældning, og kan findes i ArcGIS ved brug af Spatial Analyst værktøjet Slope. (Sørensen, Zinko, & Seibert, 2005)

I udtrykket for wetness index givet ovenover er det antaget, at jordprofilet er uniformt, det vil sige, at den vertikale strømning i jorden konstant er lig med 1 overalt i landskabet (Moore, Grayson, & Ladson, 1990).

Ved modellering af wetness index i GIS vil de høje værdier for wetness index være lokaliseret i flade områder, hvor afstrømningen konvergerer. De lave værdier for wetness index vil derimod være lokaliseret i stejle områder af landskabet, hvor afstrømningen divergerer. De høje værdier lokaliserer dermed områder, som har potentiale for en høj jordfugtighed, mens områder med lav værdi vil have lav fugtighed. (Schmidt & Persson, 2003)

Der gælder for wetness index, at udtrykket er mindre brugbart i områder, hvor der er lav hældning, da strømningsretningen i et fladt område løbende vil ændre sig (Grabs, Seibert, Bishop, & Laudon, 2009). I områder, hvor hældningen er lig nul, vil ArcGIS desuden ikke kunne være i stand til at bestemme strømningsretningen præcist, og det vil derfor være et mere tilfældigt strømningsmønster i disse områder. Der findes metoder til at fastsætte strømningsmønstret i flade områder, men dette vil ikke blive beskrevet i projektet, i stedet henvises til kapitel 10. VIDEREUDVIKLING AF MODELLERNE. Beregningsmæssigt er det ligeledes ikke muligt at finde wetness index i områder, hvor hældningen er lig nul, da man ikke kan dividere med nul. Hvordan dette problem er blevet behandlet fremgår af fremgangsmåden beskrevet herunder.

Endelig skal det for landskabet gælde, at der er en betydelig underjordisk gennemstrømning eller overfladisk afstrømning for at wetness index kan anvendes (Schmidt & Persson, 2003).

I GIS-modelleringen beregnes wetness index som beskrevet ovenover. Efterfølgende ændres den måde, hvorpå Flow Accumulation, α , udregnes, således at afstrømningsmønstret afhænger af forseglingsprocenten lokalt.

6.5.1 Fremgangsmåde i ArcGIS: Wetness index uden indførsel af forseglingsprocent

GIS-modellen for wetness index er udarbejdet med udgangspunkt i den digitale terrænmodel, hvor højdeinformationen ligger i 10 meter grid. Det er valgt at anvende den generaliserede højdemodel med 10 meter grid, da kortlægningen af wetness index er beregningsmæssig tung. Opbygningen af modellen i ArcGIS ses af Figur 21. Heraf fremgår det hvilke input og værktøj, der er anvendt i modellen.

Modellens udformning kan være forskellig alt efter, hvordan parametrene α og β udregnes. Som beskrevet tidligere, anvendes Flow Accumulation til at bestemme parameteren α . For at finde Flow Accumulation i ArcGIS skal strømningsretningen først bestemmes. Dette gøres ved brug af Spatial Analyst værktøjet Flow Direction, hvor den stejleste nedadgående retning findes for hver celle i forhold til cellens 8 naboceller (Sørensen, Zinko, & Seibert, 2005). Der er forskellige metoder til at bestemme strømningsretningen, men i denne kandidatafhandling vælges den traditionelle, som netop beskrevet. Det vælges, at beregne hældningen, β , i grader, da dette er angivet i litteraturen Burrough & McDonnell, 2000.

Flow Accumulation: Flow Accumulation er en beregning af, hvor meget vand hver enkelt celle modtager fra celler opstrøms inden for samme opland. Dermed får oplandets areal og vandløbets forgreningsmønster betydning for Flow Accumulation. Hvis der ikke medtages en vægtningsraster, så regnes der på, at hver enkelt celle overhældes med en enhed vand, hvorefter strømningsretningen anvendes til at udregne, hvor mange enheder vand, hver enkelt celle modtager. De celler, som ikke modtager noget vand fra andre celler, vil være toppunkter i terrænet og de topografiske vandskel. (Schmidt & Persson, 2003) Det er vigtigt at bemærke, at der ved denne udregning ikke tages højde for, at noget af vandet opfanges, fordamper, nedsiver til grundvandet eller strømmer gennem kloakken til recipienter eller renseanlæg. Ligeledes tages der ikke højde for forskelle i nedbørsmængder. (ArcGIS Desktop Help)

Det fremgår af Figur 21, at der påbegyndes to sideløbende processer i ArcGIS; (1) og (2), begge med udgangspunkt i den udklippede højdemodel.

Ad (1): Som beskrevet ovenover vælges det at beregne hældningen i grader. Næste skridt er at tage tangens af hældningen. Her opstår dog et problem, da Raster Calculator tolker input som radianer (ArcGIS Desktop Help). Derfor er det nødvendigt at konvertere hældningen i grader til radianer. Dette gøres ved følgende Raster Calculator:

$$\text{Raster Calculator (1)} = \frac{\text{Hældning i grader}}{180/\pi} = \text{HældningRadian}.$$

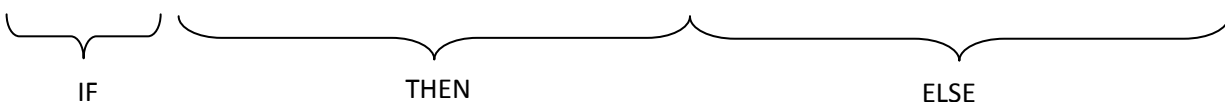
Hvor π selvfølgelig står for π i Raster Calculator. Herefter kan tangens tages på denne:

$$\text{Raster calculator (2)} = \text{Tan}(\text{HældningRadian}).$$

Eftersom man ikke kan dividere med nul, er det nødvendigt at ændre de områder, hvor $\text{Tan}(\text{hældningen}) = 0$, til 0,0001, hvilket derved gør beregningen af wetness index mulig. For at foretage denne ændring benyttes Raster Calculator igen med indførsel af funktionen CON.

CON: CON er en IF-THEN-ELSE funktion, det vil sige, at hvis input, hvilken udgør en betingelse, er sandt, så returneres en output værdi eller raster, og hvis betingelsen ikke er opfyldt (altså den er falsk), så returneres en anden output værdi eller raster:

CON beregning =
 $\text{CON}(\text{Input betingelse}, \text{Output som returneres hvis inputbetingelsen er sand}, \text{Output som returneres hvis inputbetingelsen er falsk})$

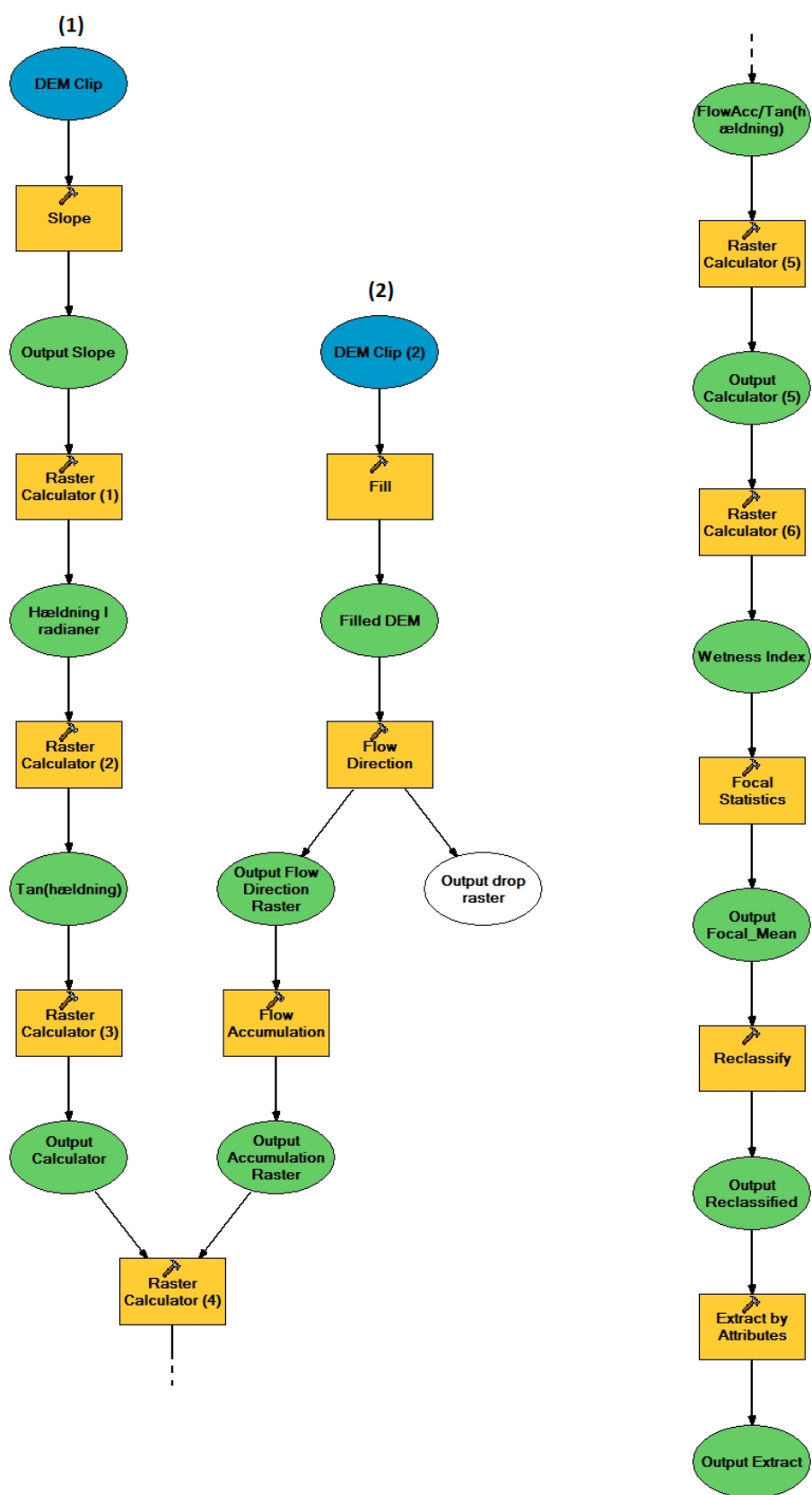


The diagram illustrates the structure of the CON function. It shows the text 'CON beregning =' followed by the function syntax in parentheses. Brackets are drawn under the three arguments: the first argument is bracketed and labeled 'IF', the second argument is bracketed and labeled 'THEN', and the third argument is bracketed and labeled 'ELSE'.

I modellen skal de områder, hvor $\text{Tan}(\text{hældningen}) = 0$, sættes lig 0,0001, mens de resterende områder bibeholder deres værdi. Dette skrives på formen:

$$\text{Raster Calculator (3)} = \text{CON}(\text{Tan}(\text{HældningRadian}) = 0, 0.0001, \text{Tan}(\text{HældningRadian})).$$

Ad (2): I denne proces findes Flow Accumulation. Forud for udregningen heraf, er det nødvendigt at gennemføre et tvungent udløb ved at fylde lavninger i terrænet, da lavninger i ArcGIS vil kunne modtage uendelige mængder vand uden at have noget udløb. ArcGIS er dermed ikke i stand til, at udfylde lavningerne og derefter lade efterfølgende tilstrømning strømme videre. I udførelsen heraf anvendes værktøjet Fill, hvor det vælges at fylde *alle* lavninger og huller i terrænet, for at opnå en afstrømning ud til fjorden. Dernæst findes Flow Direction og Flow Accumulation, hvor der i beregningen af Flow Accumulation ikke indføres en vægtningsraster.



Figur 21: Modelbuilder af wetness index uden indførsel af forsegling

De to processer samles nu til én ved fjerde Raster Calculator:

$$\text{Raster Calculator (4)} = \frac{\text{Flow Accumulation}}{\text{Raster Calculator (3)}}$$

Herved beregnes parentesens i wetness index: $\alpha/\tan\beta$.

Da den naturlige logaritme løber over intervallet $]0; \infty]$, er det ikke muligt at udregne wetness index, da udregningen af $\alpha/\tan\beta$ giver værdier lig nul. For at gøre det muligt at udregne wetness index, vælges det at ændre nul-værdierne til 0,0001. Dette gøres igen ved funktionen CON i Raster Calculator:

$$\text{Raster Calculator (5)} = \text{CON}(\text{Raster Calculator (4)} = 0, 0.0001, \text{Raster Calculator (4)})$$

Til sidst kan wetness index udregnes ved sjette Raster Calculator:

$$\text{Raster Calculator (6)} = \ln(\text{Raster Calculator (5)}).$$

Det fremkomne resultat viser store kontraster mellem nærliggende områder, hvorfor kortet er meget ujævnt med skarpe udsving mellem høje og lave værdier for wetness index. Dette er ifølge Schmidt & Persson, 2003, et almindeligt resultat for beregning af wetness index. Med fordel kan værktøjet Focal Statistics anvendes, hvorved de store kontraster udglattes (Schmidt & Persson, 2003). I brugen af Focal Statistics udregnes en middelværdi for en cirkel med diameter på tre celler af griddet, som cellen i midten efterfølgende tildeles som værdi. Dette gøres for alle celler i analysen.

For at opnå et mere overskueligt kort, som illustrerer, hvorhenne de høje værdier for wetness index er lokaliseret, omklassificeres beregningen af wetness index til ni klasser, opdelt efter Natural breaks. Natural breaks grupperer værdier, som ligger tæt op ad hinanden, og dermed sættes grænserne der, hvor afstanden mellem værdierne er relativ stor (ArcGIS Desktop Help). Dernæst benyttes værktøjet Extract by Attributes, hvor de områder, som har størst wetness index uddrages.

6.5.2 Fremgangsmåde i ArcGIS: Wetness index med indførsel af forseglingsprocent

Den udarbejdede model af wetness index udbygges ved at inkorporere forseglingsprocenten. Til dette formål ønskes det i beregningen af Flow Accumulation at medtage værdier for forskellige arealtypers forseglingsprocent, således at den overfladiske afstrømning afhænger af jordens forsegling. Som beskrevet tidligere, vil størrelsen af den overfladiske afstrømning netop afhænge af jordens forsegling, hvor arealtyper som eksempelvis veje og bebyggelse har en høj forseglingsprocent i forhold til arealtyper som græsplæner og skove.

Fremgangsmåden for denne metode forløber som fremgangsmåden for wetness index, hvor der i beregningen af Flow Accumulation indføres en vægtningsraster. I det følgende beskrives det derfor, hvordan denne vægtningsraster er udarbejdet, mens opbygningen kan ses af Figur 22.

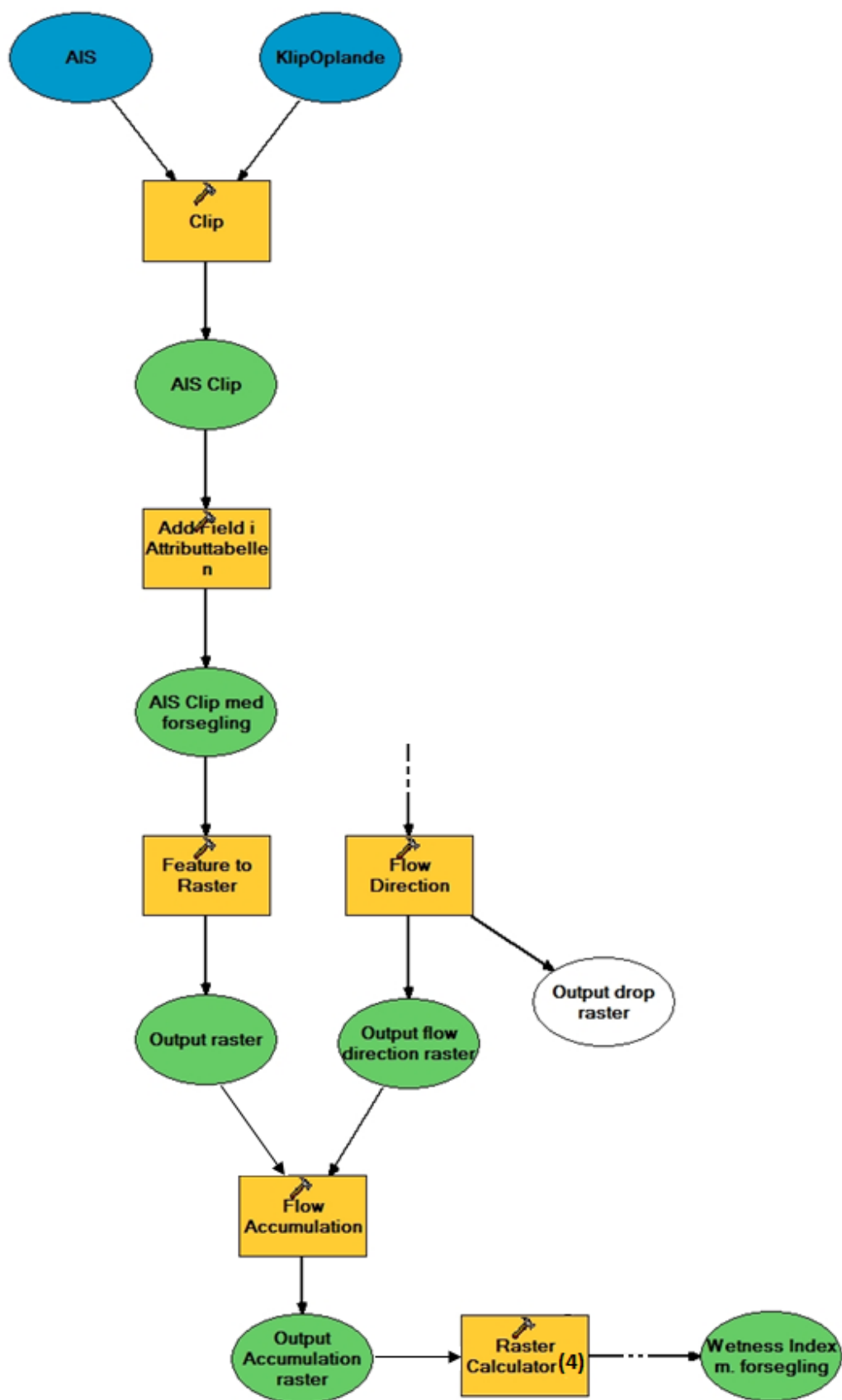
Først og fremmest tilføjes der et arealanvendelseskort til ArcGIS. Dette er et vektor-tema, hvor forskellige arealtyper er beskrevet med arealanvendelsestype og kortlagt som polygoner. Det anvendte arealanvendelseskort er fra 1999 fra DMU: AIS, og har et målestoksforhold på 1:25.000 (Geodatabiblioteket). Efter arealanvendelseskortet er udklippet efter de to oplande, som projektets analyser er modelleret over, åbnes attributtabellen for det udklippede arealanvendelseskort. Her tilføjes et

felt, hvor forseglingprocenten for de forskellige arealtyper indskrives. Forseglingprocenten fremgår af Tabel 2, og er bestemt ud fra Tabel 1, side 22 og Figur 9, side 26. Til fastsættelse af forseglingprocenten for forskellige bebyggelsestyper er tal fra Figur 9, side 26 anvendt, hvor overfladeafstrømningen er lagt sammen med fordampningen. Mens forskellige vejtyper inklusiv jernbane er bestemt ved et gennemsnit af tallene for den pågældende vejtype i Tabel 1, side 22. Da det kun ønskes at vurdere, hvilken indflydelse forseglingprocenten har på wetness index, tildeles bebyggelsestyper og vejtyper forskellige værdier, mens de resterende arealtyper tildeles ens vægt, nemlig 15, som er gennemsnittet for arealerne; parker, haver og græsplæner, jævnfør Tabel 1, side 22. Modellen kunne videre udbygges ved at tildele forskellige vægte til de resterende arealtyper efter eksempelvis nedsivning eller fordampning, men da dette ligger uden for projekts hovedfokus er denne analyse undladt.

Da vægtningsrasteren til Flow Accumulation, som det fremgår af navnet skal være af data-typen raster, konverteres filen til raster med celledørrelse 10, hvorefter Flow Accumulation beregnes.

Kode	Kode navn	Forsegling
1121	Høj bebyggelse	85
1122	Åben bebyggelse	65
1123	Bebyggelse i åbent land	58
1221	Motorvej	87,5
1222	Motortrafikvej	87,5
1223	Vej > 6 meter	87,5
1224	Vej 3-6 meter	87,5
1226	Jernbane	20
2112	Landbrug	15
2300	Græsarealer	15
2310	Græs i byområder	15
3100	Skov	15
3110	Løvskov	15
3120	Nåleskov	15
3130	Blandet skov	15
3210	Overdrev	15
3220	Hede	15
3310	Sand/klit	15
3330	Anden overflade med ringe vegetation	15
4110	Eng	15
4112	Vådområde	15
4120	Mose	15
4210	Marsk og strandeng	15
5120	Sø	15
5121	Vandløb > 8-12 meter	15
	Dambrug	15
5230	Hav	15
6000	Uklassificeret	15

Tabel 2: Tildelt forseglingprocent til oplandendes arealtyper.



Figur 22: Inkorporering af forseglingsprocent i modellering af wetness index. For beskrivelse af Raster Calculator (4) se fremgangsmåde for Wetness Index uden forseglingsprocent.

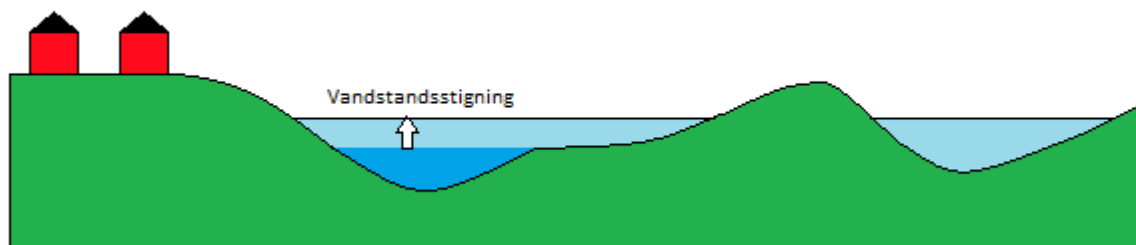
6.6 Modellering af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb

Ved store nedbørshændelser vil vandstanden i vandløbene stige, da store mængder vand strømmer som overfladisk afstrømning og underjordisk gennemstrømning til vandløbene. Samtidig vil regnvand fra forseglede, separatkloakerede områder, som veje og bebyggede arealer, via kloakker ledes til vandløbene. I et fælleskloakeret område vil regnvand sammen med spildevand ledes til vandløbene ved ekstremregn. Det er tidligere blevet belyst, at Aalborgs åer og vandløb virker som recipienter for kloakvand, jævnfør Figur 7, side 25. Fra tidligere haves desuden en viden om, at overfladisk afstrømning opstår, når jorden mættes med vand, hvilket først vil ske ved vandløbet, og dernæst i stadig større afstande til vandløbet, i takt med at jorden gradvist mættes. Dermed opstår oversvømmelserne først nærmest vandløbet, og som der falder mere nedbør udbredes området i takt med, at jorden mættes. På baggrund heraf, samt undersøgelsen af, hvorfor oversvømmelser opstår i Aalborg, jævnfør afsnit 5.4 Årsager til oversvømmelser i Aalborg, vurderes det relevant at undersøge, hvilke områder, der er i risiko for oversvømmelser fra Aalborgs åer og vandløb.

Modelleringen heraf består af to dele; en lokalt differentieret højdeallokeringsmodel og en udbredelsesfunktion ved implementering af værktøjet Cost Distance.

6.6.1 Første del: Lokalt differentieret højdeallokeringsmodel

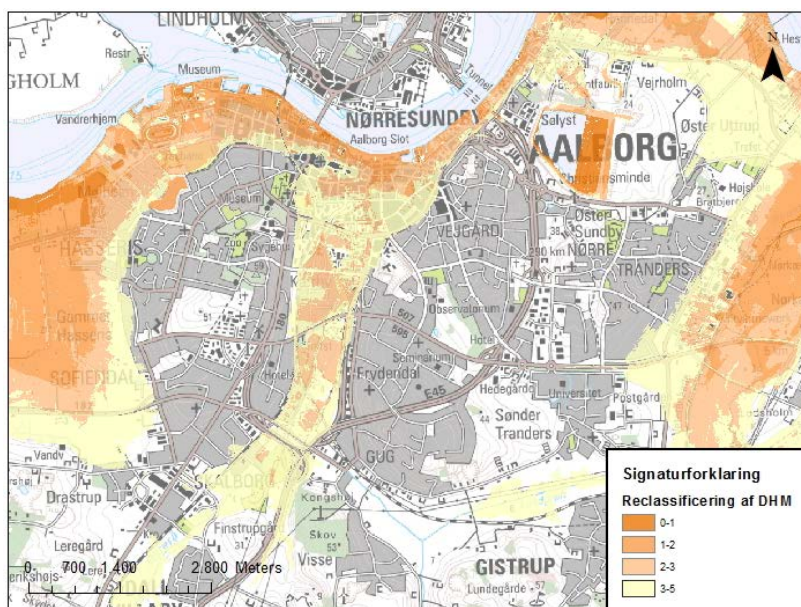
Første trin i modelleringen af vandudbredelse fra vandløb er at udarbejde en højdeallokeringsmodel, som kortlægger områder, der er i risiko for oversvømmelse ved forskellige vandstandsstigninger, da områderne er lavere placeret end koten i terrænet ved den pågældende vandstandsstigning. Hvilke områder, som højdeallokeringsmodellen lokaliserer, er skitseret i Figur 23.



Figur 23: Vandstandsstigning ved lokalt differentieret højdeallokeringsmodel, hvor lyseblå områder vil blive kortlagt i modelleringen.

Modellering af vandstandsstigninger i vandløb kompliceres af, at vandløbets højde over havoverfladen afhænger af afstanden til udløbet. For projektets to udpegede oplande vil koten i de vandløb, som udmunder i Limfjorden, stige, som afstanden til udløbet forøges. Hvis den absolutte højde blev tillagt vandstandsstigninger, vil de oversvømmelsestruede områder kun være lokaliseret i den nederste del af vandløbet, hvor højden i terrænet er lavest. Dette scenarie er kortlagt på Figur 24. Resultatet heraf er ikke brugbart, da det ønskes, at udpege oversvømmelsestruede områder langs hele vandløbet. For at undgå dette, ønskes det at udarbejde en højdemodel, hvor vandløbenes højder allokeres til det omkringliggende terræn. Mere præcist ønskes det, at overføre vandløbets aktuelle højde fra den digitale højdemodel for alle vandløbsafsnit til det nærmeste opland defineret af det areal, der er tættest vandløbsafsnittet på hver side af vandløbet. Til dette formål anvendes værktøjet Euclidean Allocation. Herved er det muligt at undersøge,

hvilke områder der oversvømmes langs hele vandløbet, hvis der tillægges bestemte højder i den digitale terrænmodel.



Figur 24: Omklassificering af den digitale terrænmodel med 1,6 meter grid.

Inspirationen til denne analyse kommer fra Ian Berg Sonne, ansat ved KMS, som har præsenteret en metode til modellering af vandstandsstigning i vandløb ved brug af værktøjet Euclidean Allocation. I pdf-filen Sonne: *GIS og Grøn Vækst* skildres tankegangen og udførelsen bag metoden herfor.

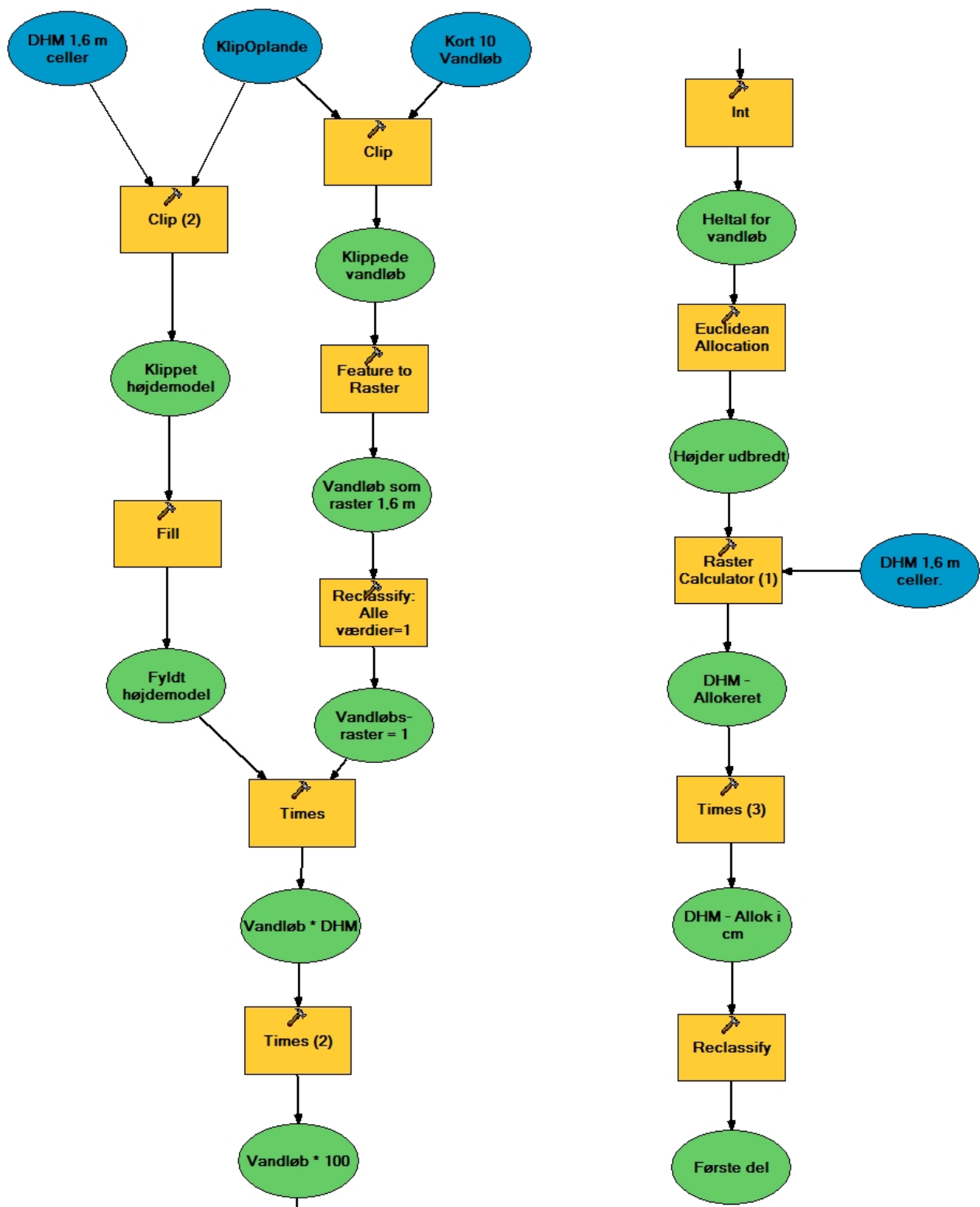
6.6.1.1 Fremgangsmåde i ArcGIS: Lokalt differentieret højdeallokeringsmodel

Til udførelsen af denne model anvendes Danmarks højdemodel med 1,6 meter grid. Det ønskes i analysen at tillægge den absolutte højde vandstandsstigninger på under 1 meter, hvorfor det er nødvendigt at anvende højdemodellen med 1,6 meter grid. Ved anvendelse af denne højdemodel bliver det derved muligt at modellere vandudbredelsen ved mindre højdeforskelle, eksempelvis i form af diger.

Fremgangsmåden for fremstillingen af første del af modellen ses af Figur 25. Heraf ses det, at første trin er at udklippe højdemodellen efter de udklippede oplande, hvorved beregningshastigheden optimeres.

Sideløbende hermed tilføjes et vandløbs-tema fra Kort10.

Kort10: Kort10 består af en samling af topografiske data, som er dannet på baggrund af Kort & matrikelstyrelsens grundlæggende databaser. Kortets geometri er dannet ved fotogrammetri. Målestoksforholdet er 1:10.000, hvilket giver en nøjagtighed på 1 meter. (Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen, 2006) Vandløbs-temaet hører under kort10-temaet Hydrografi, og er et vektor-tema, hvor vandløb er kortlagt som linjer.

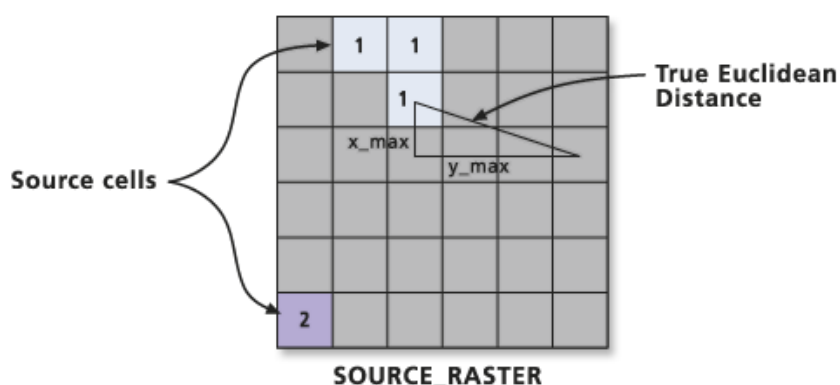


Figur 25: Første del af modellering af vandudbredelse ved anvendelse af værktøjet Euclidean Allocation.

Vandløbs-temaet skal ligeledes udklippes efter de udklippede oplande, dette gøres ved Analysis værktøjet Clip. Efterfølgende konverteres det udklippede linje-tema til raster med celledørrelse 1,6 meter, som ved en omklassificering gives værdien 1 for alle vandløb. Nu multipliceres den omklassificerede vandløbs-raster med højdemodellen, hvorved højdemodellens kote tilknyttes vandløbs-rasteren.

Den tilknyttede kote i vandløbet ønskes nu, at blive bredt ud til det omkringliggende landskab. Til dette formål anvendes Spatial Analyst værktøjet Euclidean Allocation. Værktøjet Euclidean Allocation beregner ved Euclidean Distance den nærmeste kilde for hver en celle.

Euclidean Distance: Den euklidiske afstand bestemmer den korteste afstand fra hver enkelt celle til de specificerede kilde-celler. Afstanden beregnes ud fra cellernes midtpunkt, og når kateterne a og b kan beregnes ud fra cellernes længde, kan hypotenusens længde beregnes, se Figur 26.



Figur 26: Bestemmelse af euklidisk afstand ved værktøjet Euclidean Distance. Fra (ArcGIS Desktop Help).

Denne afstand bestemmes fra hver en celle til hver en kilde. Når den nærmeste kilde er lokaliseret tilknyttes den pågældende celle denne nærmeste kilde-celle. Hvis der er to kilde-celler, som har ens afstand til en celle, så tildeles cellen den værdi for den først fundne kilde-celle.

Euclidean Allocation: Som beskrevet ovenover, så findes Euclidean Allocation ved beregning af Euclidean Distance. Ved den euklidiske allokering tildeles en celle den nærmeste kildes værdi. Ved udførslen findes derfor, for hver en celle, den nærmeste kilde baseret på euklidisk afstand, dernæst tildeles cellen denne kilde-celles værdi. Dermed får alle celler tildelt en værdi efter nærmeste kilde-celle.

Ved brug af værktøjet Euclidean Allocation er det et krav, at input kilde-rasteren er et heltal. Derfor ændres vandløbs-rasteren til centimeter ved brug af Spatial Analyst værktøjet Times (der multipliceres med 100), hvorefter Spatial Analyst værktøjet INT anvendes med højdemodellen i centimeter som input. Værktøjet INT har den funktion, at input rundes til nærmeste heltal ved trunkering.

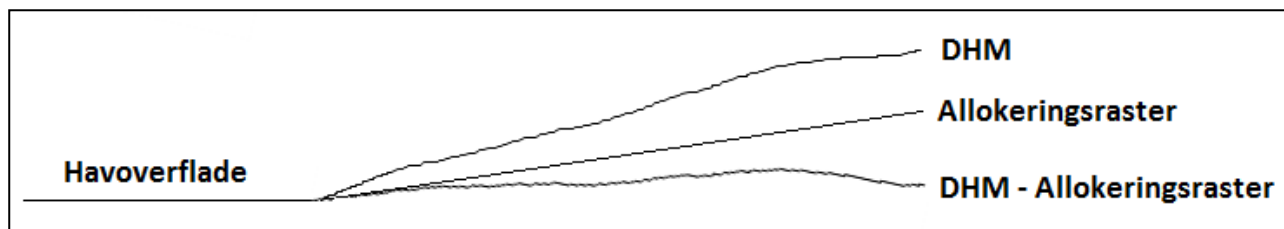
Efterfølgende kan Euclidean Allocation køres med vandløbs-rasteren i heltal, som input kilde-data. Når der er tilknyttet en højdeværdi til kilde-dataen, vil de resterende celler, dem som ikke tilhører kilde-rasteren, få tildelt den kote, som den nærmeste kilde-celle har.

Ved at trække den allokerede raster fra den oprindelige højdemodel, findes højdeafstanden mellem de to lag, og der fås derved en raster som både indeholder højdeinformationen for terrænet og for den allokerede raster. Dette gøres i Raster Calculator (1):

$$Raster\ Calculator\ (1) = DHM - \left(\frac{Euclidean\ Allocation\ raster}{100} \right),$$

hvor der divideres med 100, for at få højdeinformationen tilbage i meter.

Ved denne beregning fås et terræn, som ikke hælder ned mod Limfjorden, resultatet er visualiseret i Figur 27.



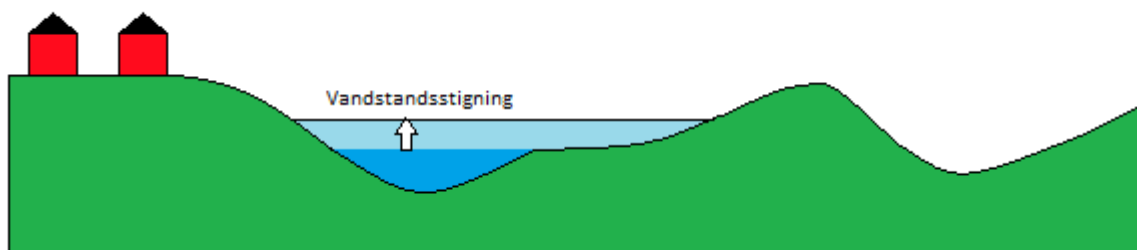
Figur 27: Resultat når allokeringsrasteren trækkes fra højdemodellen. Allokeringsrasteren vil være beliggende lidt under højdemodellen (set fra siden), da allokeringsrasteren er dannet ud fra vandløbenes højder, og vandløbene er lavt beliggende i terrænet. Det ses, at resultatet (DHM-Allokeringsraster) ikke stiger i højde med afstanden til havet.

Der fremkommer herved en raster, som har højder fra -25,04 til 102,46 meter, hvor nul værdierne vil være ved vandløbene. Tallene ønskes nu i centimeter, hvorfor der multipliceres med 100 ved brug af Værktøjet Times.

6.6.2 Anden del: Udbredelsesfunktion ved implementering af værktøjet Cost Distance

Ved modellering af første del af modellen vil der ved vandstandsstigning i vandløbene oversvømmes områder, som ikke er i nærheden af vandløbet, eller som er beskyttet af topografien i form af eksempelvis diger. Derfor specificeres det i anden del af analysen, at de områder, som oversvømmes er forbundet til vandløbene, det ønskes således at præcisere modellen, således at vandudbredelsen sker fra vandløbene.

Til dette formål anvendes værktøjet Cost Distance på højdeallokeringsmodellen. Ved brug af værktøjet Cost Distance er det muligt at tage højde for barrierer i terrænet, som eksempelvis diger eller andre topografiske forskelligheder i terrænet, der kunne bremse vandstrømmen i at udbrede sig yderligere. Derved findes de områder, som vandet fra vandløbet kan nå ved udbredelsen, hvor forskellige vandstandsstigninger kan simuleres. De områder, som lokaliseres ved anvendelse af værktøjet Cost Distance, er skitseret i Figur 28. Det ses ved sammenligning af Figur 23, side 46, og Figur 28, at der ved brug af værktøjet Cost Distance, i modsætning til højdeallokeringsmodellen, kun udpeges områder i forbindelse med vandløbene. Inspirationen til fremgangsmåden for modellering af vandudbredelse fra vandløb ved brug af værktøjet Cost Distance kommer fra og Sonne & Toxvig: *Kortlægning af ejendomme der rammes af vandstandsstigninger ved hjælp af Danmarks højdemodel*.



Figur 28: Oversvømmelsestruede områder lokaliseret ved anvendelse af værktøjet *Cost Distance*.

6.6.2.1 Værktøjet *Cost Distance*

Ved brug af værktøjet *Cost Distance* kan den mindste vægtede afstand fra en kilde til alle andre områder i det pågældende analysefelt bestemmes. Den mindste vægtede afstand er den mest omkostningseffektive vej, hvor omkostningen kan opgøres i forskellige enheder, eksempelvis pris, arealtype eller højder i terrænet. I forbindelse med kortlægning af oversvømmelsestruede områder kan værktøjet anvendes til at kortlægge, hvilke områder der bliver oversvømmet, hvis vandstanden stiger i hav eller vandløb. Metoden bliver derved anvendelig til at kortlægge risikoområder for oversvømmelse i Aalborg omkring byens åer. Især for områder omkring Øster Å er metoden anvendelig, da disse områder gentagne gange oversvømmes på grund af forøget tilstrømning til åen.

Når *Cost Distance* modelleres i ArcGIS er det første skridt at definere kilden, hvorfra *Cost Distance* til alle øvrige celler skal beregnes. I projektets analyse vil Aalborgs vandløb via et vandløbs-tema fra Kort10 (beskrevet tidligere) udgøre kilden. Dernæst modelleres et omkostningsraster, som bestemmer, hvordan vandet breder sig ud over det omkringliggende terræn. Når vandet går over vandløbets breder, vil det sprede sig dynamisk til områder, hvor forhindringer, i form af eksempelvis topografi, overfladens ruhed, vegetation og arealanvendelse, udgør mindst modstand på vandets bevægelse (Brivio, Colombo, Maggi, & Tomasoni, 2002). Disse faktorer kan derfor udgøre omkostningen i anvendelsen af værktøjet *Cost Distance*. I projektets analyse af vandudbredelsen fra vandløb vil omkostningen opgøres i terrænets højde, da vandet kun spreder sig til områder, hvor koten er lavere end den angivne vandstandsstigning.

Som det fremgår af navnet *Cost Distance*, vil beregningen af den mest omkostningsfrie vej ligeledes afhænge af afstanden mellem to celler. I en raster fil har en celle otte naboceller, hvortil vandet kan strømme. Heraf er der fire tilstødende naboceller og fire diagonale naboceller. Afstanden mellem to tilstødende celler er 1, mens afstanden mellem to diagonale celler er 1,414 (kvadratroden af 2). (ArcGIS Desktop Help)

Beregningen af *Cost Distance* mellem en celle A og dens nabocelle B udføres ved følgende formel:

$$\text{Cost Distance } AB = \frac{(\text{Omkostning}A + \text{Omkostning}B) \cdot \text{Afstand}AB}{2}.$$

I formlen er *Omkostning A* og *Omkostning B* den omkostning, der er forbundet med at passere henholdsvis celle A og B. *AfstandAB* betegner afstanden mellem de to celler, som er enten 1 eller 1,414, afhængigt af de to cellers placering i forhold til hinanden. (Brivio, Colombo, Maggi, & Tomasoni, 2002)

Ved beregningen af *Cost Distance* i ArcGIS udfører programmet en iterativ proces. Som udgangspunkt tildeles kildens celler værdien nul, hvorefter *Cost Distance* mellem disse og deres naboceller bestemmes

ved brug af ovenstående formel. Af en kildes samlede naboceller udvælges nu den nabocelle, som har den laveste Cost Distance (lad det være cellen B). Denne udvalgte nabocelles naboceller udgør nu en del af analysen. Nu vælges igen en nabocelle, som har laveste Cost Distance, hvor det bemærkes, at kildens naboceller også inddrager cellen B's naboceller. Processen fortsætter efterfølgende på samme måde. Udregningen af Cost Distance fra kildens celler (fx A) til disse nye naboceller (fx C) udføres ved akkumulering af ovenstående formel, på følgende vis:

$$Cost\ Distance\ AC = Cost\ Distance_{AB} + \frac{(Omkostning_B + Omkostning_C) \cdot Afstand_{BC}}{2}.$$

For hver gang en ny nabocelle, så at sige, bliver en del af analysen, beregnes de akkumulerede Cost Distance for alle veje i de inkluderede naboceller, såvel som de nye tilføjede. Hvis der undervejs findes en ny vej til en celle, som der allerede var fundet en vej til, så kan følgende udfald ske

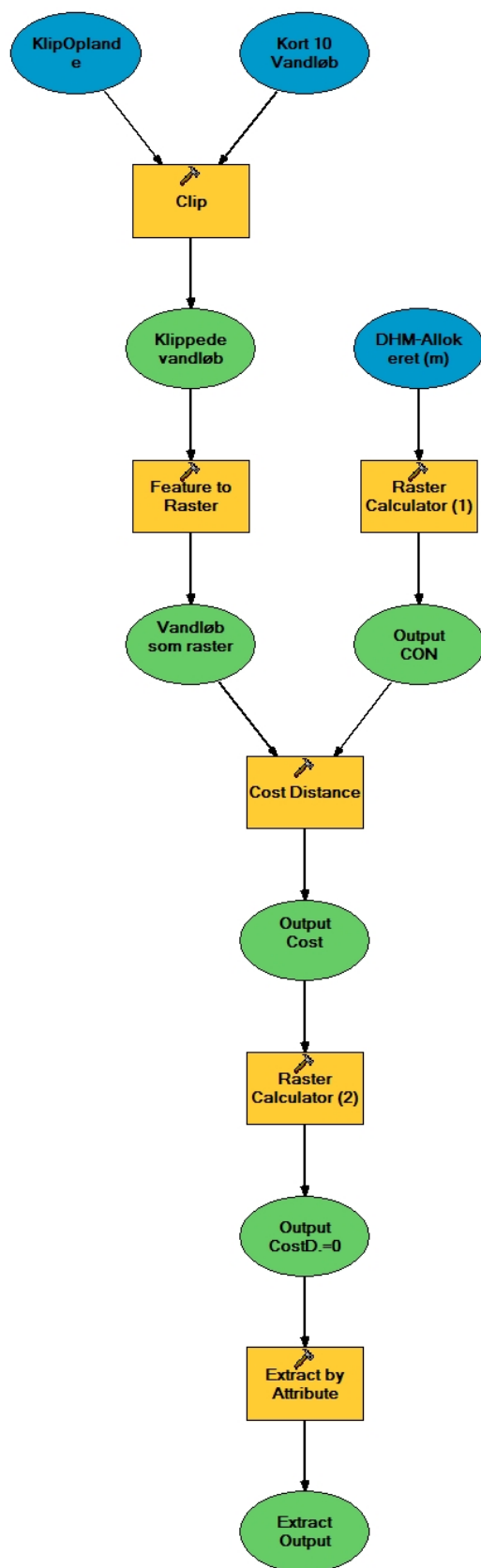
- Den akkumulerede Cost Distance værdi for den nye vej ignoreres, hvis den nye vej har større akkumuleret Cost Distance værdi end den gamle vej.
- Den akkumulerede Cost Distance værdi for den gamle vej erstattes af den akkumulerede Cost Distance værdi for den nye vej, hvis den nye vej har lavere akkumuleret Cost Distance værdi end den gamle vej.

Først når alle celler i rasteren indgår i analysen og har fået tildelt en akkumuleret Cost Distance værdi stopper den iterative proces. Den endelige Cost Distance raster identificerer således den akkumulerede Cost Distance for hver en celle i rasteren til den nærmeste celle i kilden. (ArcGIS Desktop Help)

6.6.2.2 Fremgangsmåde i ArcGIS: Udbredelsesfunktion ved implementering af værktøjet Cost Distance

For at kunne anvende værktøjet Cost Distance, skal der udarbejdes en kilde-raster og en omkostnings-raster. Dette er to sideløbende processer, som først forenes ved anvendelse af værktøjet Cost Distance. Fremgangsmåden for modelleringen ses i Figur 29.

Kilde-raster: Kilde-rasteren skal udformes med udgangspunkt i vandløbene i Aalborg. Dette gøres ved først og fremmest at tilføje et vandløbs linje-tema til ArcGIS. Dette er det samme vandløbs-tema, som anvendes i første del af analysen. Ligesom i første del konverteres vandløbs-temaet til raster med celledørrelse 1,6 meter, så det passer med den digitale højdemodel. Herved kan rasteren anvendes som kilde-raster, hvor vandløbene udgør kilden, hvorfra vandet breder sig.



Figur 29: Anden del af modellering af vandudbredelse ved værktøjet Cost Distance.

Omkostnings-raster: Som beskrevet tidligere vil omkostningen, eller den forhindring, der, så at sige, bremser vandets udbredelse fra vandløbet, være terrænets absolutte højde. Til udarbejdelse af omkostnings-rasteren anvendes en raster, dannet fra forugående metode. Dette er rasteren, som var resultatet af følgende beregning:

$$Raster = DHM \text{ fyldt} - \frac{Euclidean Allocation}{100}.$$

På denne udføres nu følgende beregninger i Raster Calculator:

$$Raster Calculator (1) = CON(Lokalt differentieret højdeallokeringsmodel < 0.2, 0, 1)$$

$$Raster Calculator (1) = CON(Lokalt differentieret højdeallokeringsmodel < 0.5, 0, 1)$$

$$Raster Calculator (1) = CON(Lokalt differentieret højdeallokeringsmodel < 1, 0, 1).$$

Derved markeres de områder, hvor højden for rasteren er mindre end værdierne 20 , 50 og 100 centimeter. Det vil sige, at der modelleres vandstandstigninger på 20, 50 og 100 centimeter overalt i vandløbene. For de celler, hvor dette er gældende, sættes værdierne til nul, mens de restende celler sættes til værdien 1.

Dermed er den anvendte omkostnings-raster dannet.

Herefter kan værktøjet Cost Distance anvendes, hvor kilde-rasteren og omkostnings-rasteren indsættes.

Efter en lang beregningstid fremkommer resultatet af Cost Distance beregningen. For at gøre resultatet brugbart, skal der nu udvælges de områder, hvor Cost Distance er lig nul, altså

$$Cost Distance AB = \frac{(OmkostningA + OmkostningB) \cdot AfstandAB}{2} = 0.$$

Cost Distance vil netop være nul for de celler, hvor omkostnings-rasteren er under den pågældende værdi; 20, 50 eller 100 centimeter, og hvor alle mellemliggende celler hen til kilden har omkostning nul. Det bemærkes af ovenstående beregning af Cost Distance, at afstanden fra kilden til cellerne (*AfstandAB* i ligningen) ikke får indflydelse i beregningen, da omkostningen er sat til at være nul for de områder, som ligger under den pågældende vandstandsstigning. Når omkostningen, som er lig nul, multipliceres med afstanden, bliver udtrykket nul, hvorved afstanden ikke får nogen betydning for resultatet.

De celler, som er lig nul, udvælges efterfølgende ved brug af Raster Calculator og funktionen CON:

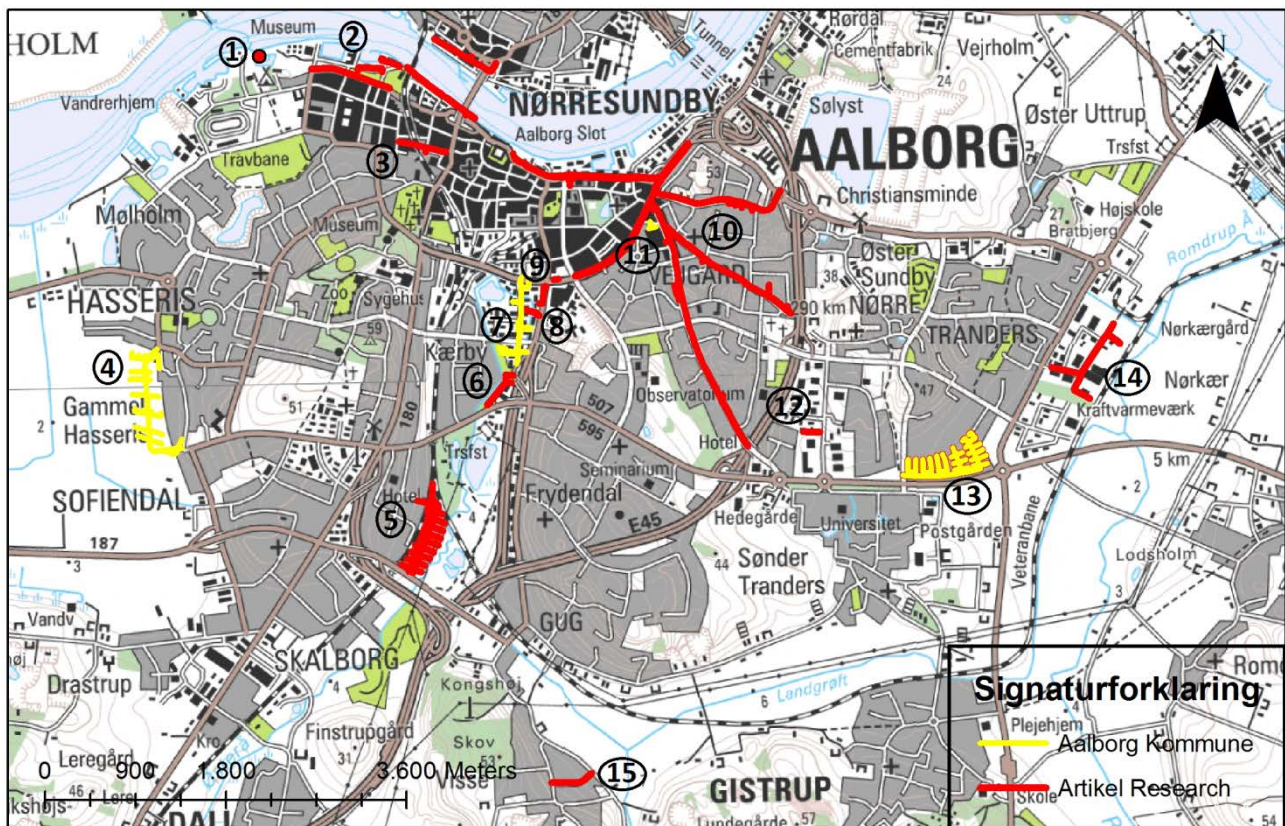
$$Raster Calculator (2) = CON(CostDistance = 0, 1, 2)$$

Hermed kortlægges det, hvilke områder der er i risiko for at blive oversvømmet, hvis vandstanden i vandløbene stiger, og vandet dermed breder sig fra vandløbet og ud over terrænet. Efterfølgende kan værktøjet Extract by Attributes anvendes, og de værdier, hvor Cost Distance er lig nul, kan uddrages.

Med fremgangsmåden på plads vil resultaterne nu i efterfølgende kapitel blive præsenteret.

7. PRÆSENTATION AF RESULTATER

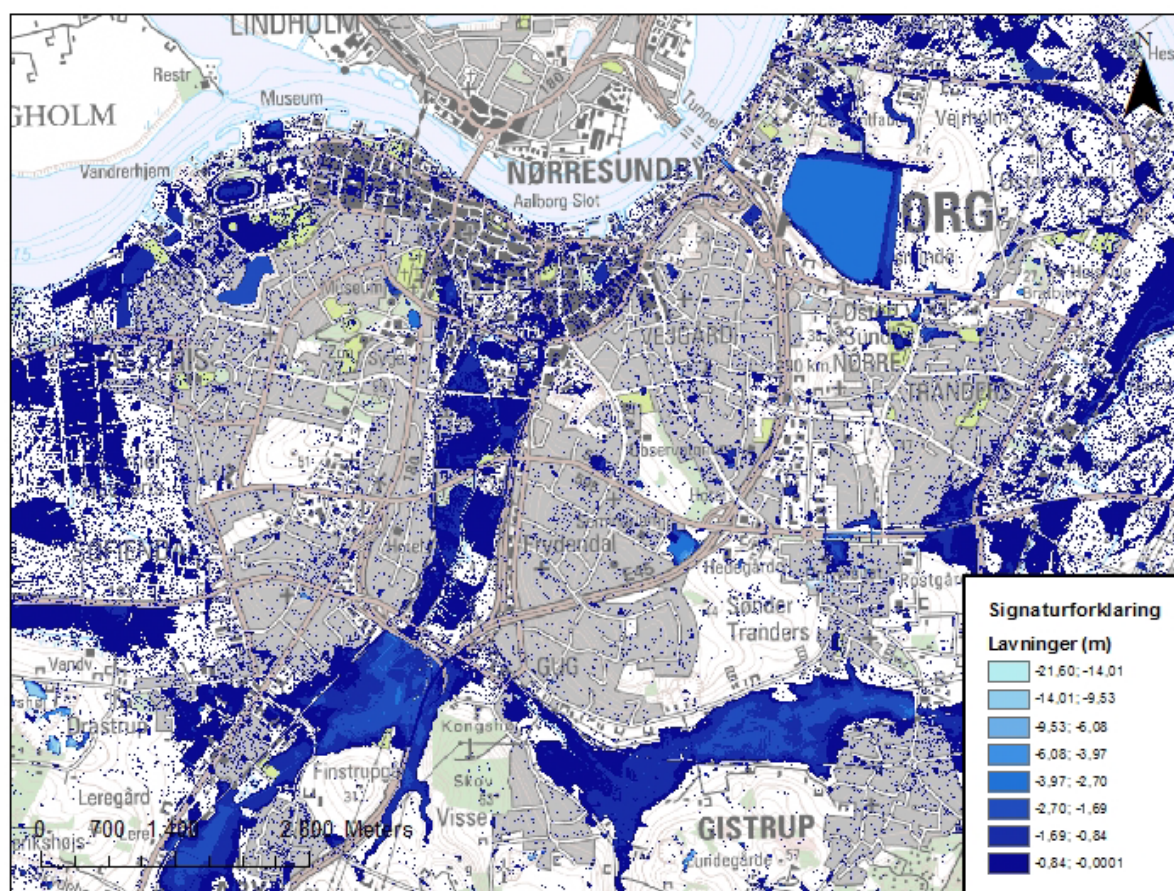
I dette kapitel vil projektets resultater af de udførte modeller til rumlig analyse blive præsenteret i kortformat, sammen med en beskrivelse af, hvad kortene viser. Dernæst sammenlignes med de områder, som allerede har været udsat for oversvømmelse, som blev udpeget i afsnit 2.3 Oversvømmelsesepisoder og deres geografiske lokalisering i Aalborg by. Disse er visualiseret i Figur 30, hvorved det i den efterfølgende beskrivelse er muligt at orientere, hvor de omtalte områder er placeret i Aalborg-området. I præsentationen omtales flere vandløb og områder i Aalborg, for at deres placering i byen henvises til BILAG III: PLACERING I AALBORG. Det er igen vigtigt at bemærke, at der i følgende kapitel skelnes mellem *projektets kortlægning*, som knytter sig til min kortlægning af GIS-modellernes resultater, og *allerede udsatte områder*, som henviser til de områder, der allerede har været oversvømmet, som blev udpeget ved interview af Michael Eilertsen ved Aalborg Kommune og ved den udarbejdede artikel research.



Figur 30: Lokalisering af allerede udsatte områder fundet ved interview af Michael Eilertsen fra Aalborg Kommune (gul) og ved artikel research af Nordjyske (rød). Nr. angivelse: 1) Strandparken Camping 2) Havneområderne: Mellem Broerne, Vestre Havnepromenade, Vestre Bådehavn, Aalborg Roklub, Nyhavnsgade, Peder Skrams Gade og Søsportsvej 3) Reberbangsgade 4) Hasseris Enge området 5) Engen og Ådalen 6) Ålykke 7) Håndværkervej 8) Nålémagervej 9) Kildely 10) Vejgaard området: Nørre Tranders Vej, Øster Sundby Vej, Hadsundvej og Østre Alle 11) Vejgaard Torv 12) Vardevej 13) Tornhøjparken 14) Svendborgvej 15) Ladegårdsvej.

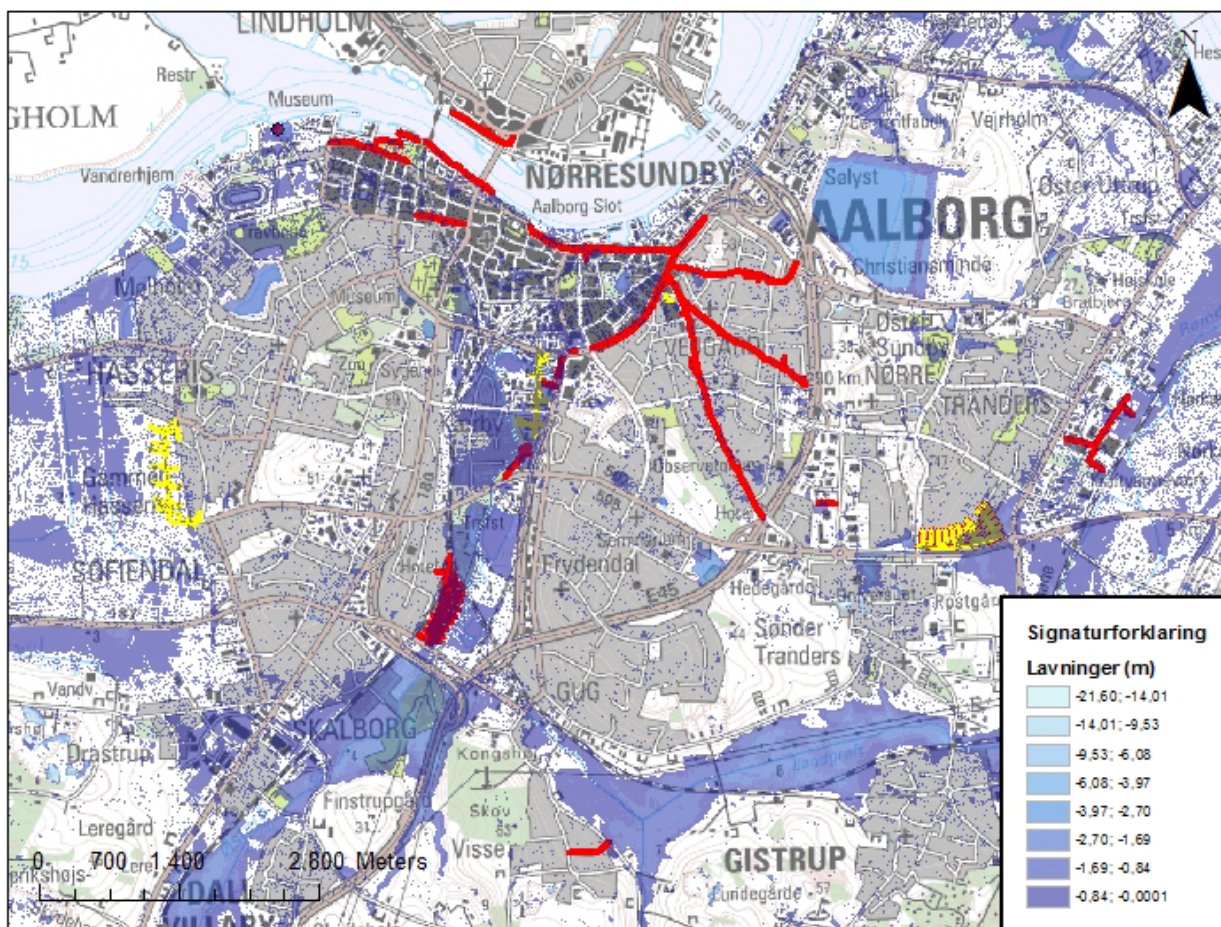
7.1 Lokalisering af lavninger

I Figur 31 er lavninger i Aalborg kortlagt ud fra projektets modellering af lavninger. Det fremgår af resultatet, at lavningerne er spredt i Aalborg med de største lavninger uden for bebyggede områder. En undtagelse heraf er de store lavninger i og omkring Kærby, hvor stort set hele bydelen samt Østerådalens er beliggende i lavninger. Den sydøstlige del af Nørre Tranders samt sydøst Skalborg er ligeledes placeret i store lavninger. Derudover er der lavninger af mindre geografisk størrelse spredt rundt i byen, primært langs havnen. Det fremgår endvidere af kortet, at flere af lavningerne ligger i forbindelse med de tre store åer i Aalborg; Hasseris Å, Øster Å og Romdrup Å. Lavningernes dybde er med enkelte undtagelser mindre end tre meter.



Figur 31: Lokalisering af lavninger.

Ved at indføre de allerede udsatte områder, kan det undersøges, hvorvidt disse områder er lokaliseret i lavninger. Resultatet heraf ses på Figur 32.



Figur 32: Lokaliserede lavninger og allerede udsatte områder fundet ved artikel research (rød) og interview (gul).

Det fremgår af Figur 32, at flere af de områder, som allerede har været udsat for oversvømmelser, er lokaliseret i lavninger. Dette er gældende for områderne i Kærby, hvor Ålykke (nr. 6), Håndværkervej (nr. 7), Nålemagervej (nr. 8) og Kildely (nr. 9) jævnligt oversvømmes (se Figur 30 for vejenes placering i byen). Ligeledes er dele af Tornhøjparken (nr. 13) og dele af Vardevej (nr. 12) placeret i lavninger. Endelig fremgår det, at Ladegårdsvej (nr. 15) og Svendborgvej (nr. 14) er helt opgrænsende til lavninger. For de resterende områder, der allerede er udsat for oversvømmelse fremgår det af Figur 32, at områderne ikke er placeret i lavninger.

Ud fra den udarbejdede artikel research vides det, at oversvømmelserne i Reberbangade (nr. 3) finder sted i en viadukt under jernbanen, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH. Det er derfor interessant, om denne lavning kan ses af *projektets kortlægning* af lavninger. Derfor er der zoomet ind på Reberbangade på Figur 33. Heraf ses det, at der er markeret en lavningen under jernbanen, hvor oversvømmelserne finder sted. Dele af Reberbangade bliver således også lokaliseret som lavning i *projektets kortlægning*. Det fremgår af Figur 33, at der er mange mindre lavninger omkring Reberbangade, og at gårdarealer mellem høje lejlighedsbygninger ligeledes udpeges som lavninger.



Figur 33: Lavninger i og omkring Reberbansgade. Ortofoto fra 2010: Ophavsrettigheder: COWI.

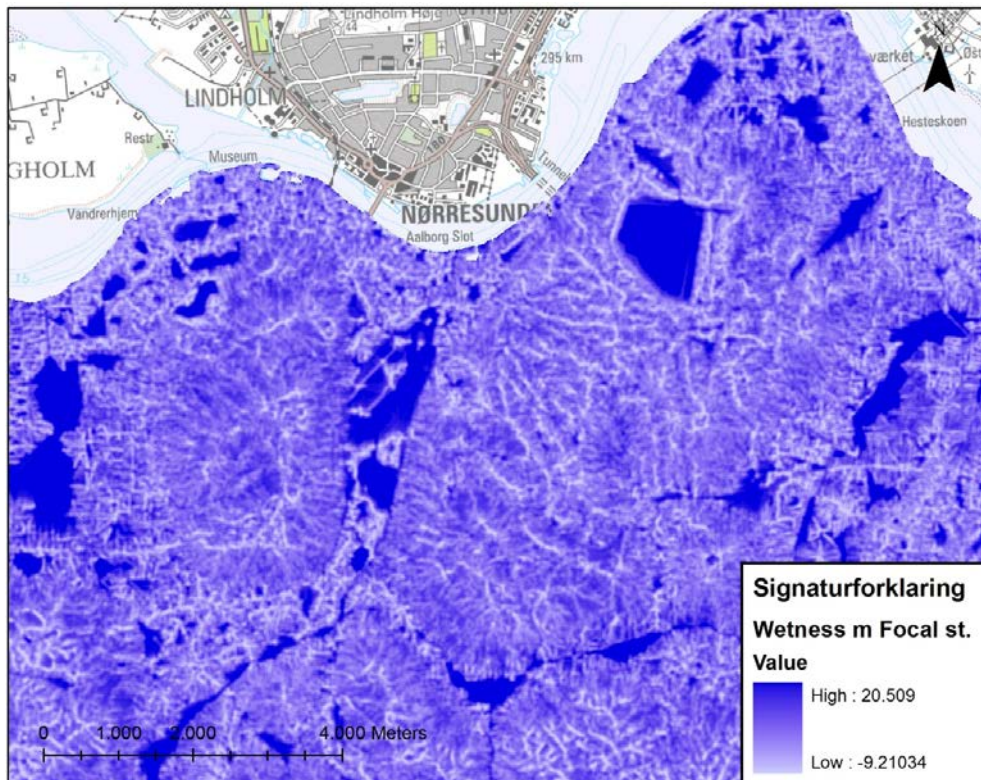
7.2 Wetness index uden indførsel af forseglingsprocent

Den fundne wetness index, hvor der ikke er taget højde for forseglingsprocent, viser, hvor nedbøren samler sig i landskabet. Resultatet heraf fremgår af Figur 34.

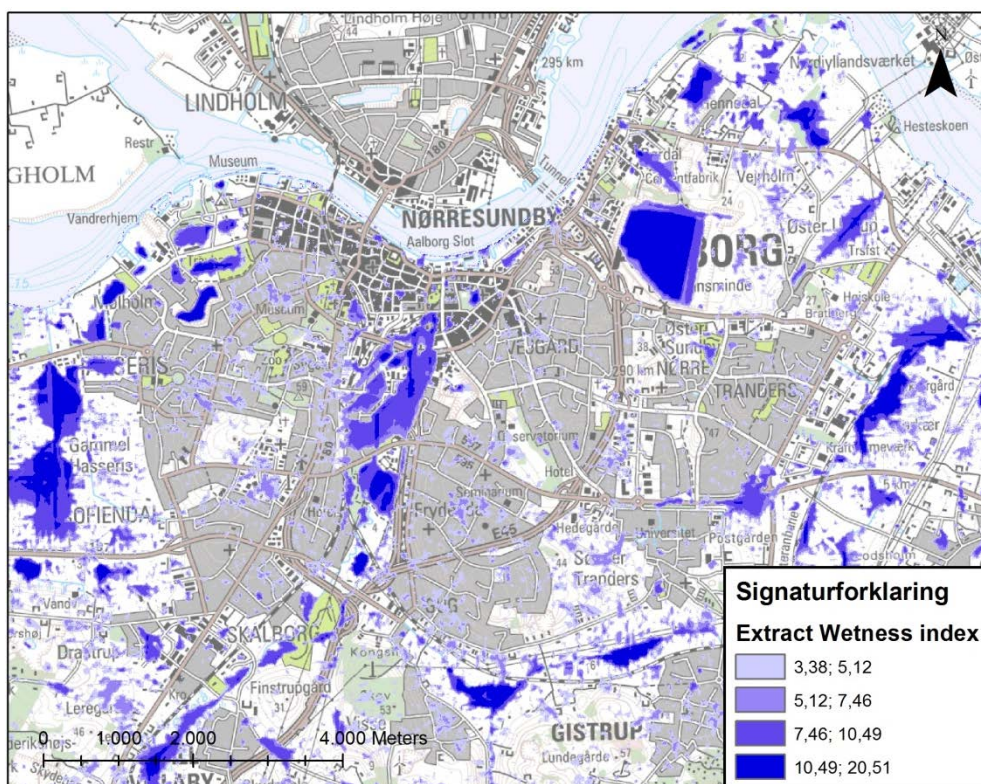
Det ses af Figur 34, at wetness index i Aalborg ligger mellem -9,21 og 20,51, hvor de lave værdier for wetness index indikerer lavt grundvandsspejl og høje værdier for wetness index indikerer højt grundvandsspejl og deraf risiko for oversvømmelse. Her ses de høje værdier i forbindelse med vandløbene, søer og kridtgravene, hvor hældningen må være nul. Dette stemmer overens med teorien om wetness index, hvor det blev beskrevet, at høje værdier fås i flade områder, hvor afstrømningen konvergerer.

For at kunne aflæse de *våde områders* (de områder med stor værdi for wetness index) lokalitet i Aalborg er der udarbejdet et kort, som kun medtager store værdier for wetness index. Resultatet heraf ses i Figur 35. Det ses af Figur 35, at de våde områder er placeret vest for Hasseris, ved Kærby, langs Øster Å, Østre Landgrøft, langs Landgrøften, langs Romdrup Å og ved vandløbsopdelingen i Indkildestrømmen og Landgrøften nordøst for Visse.

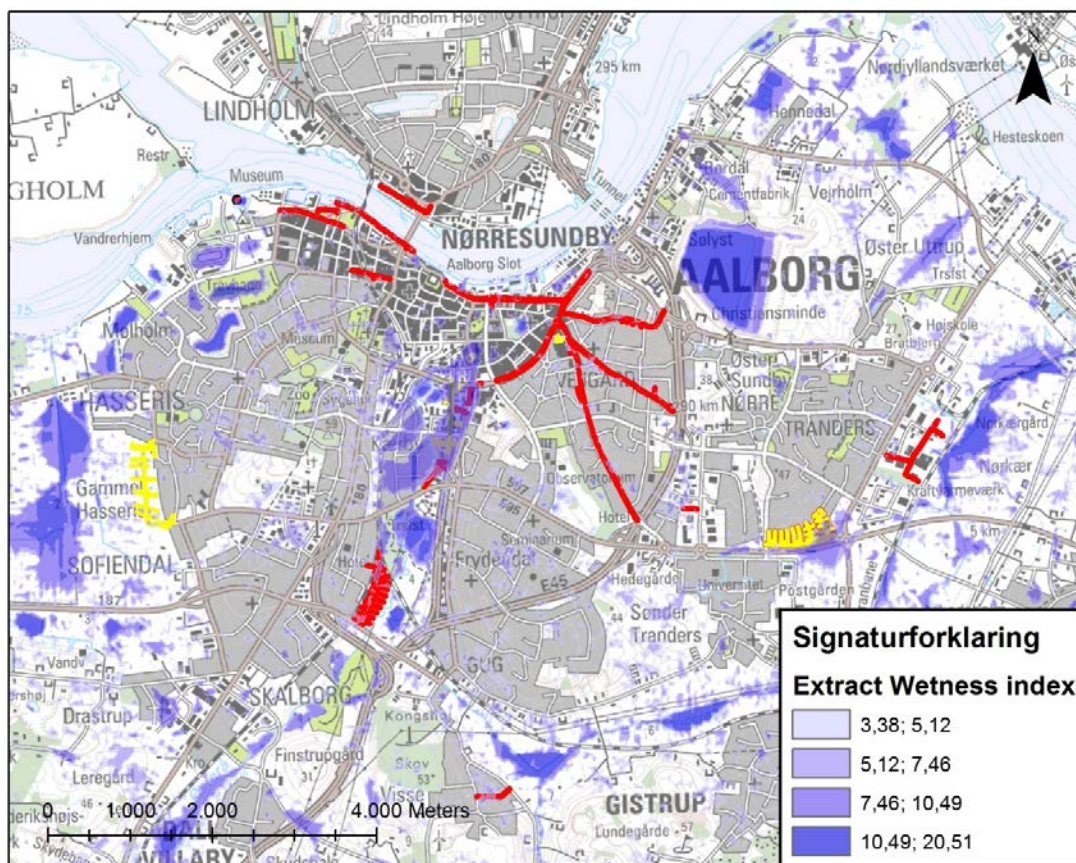
Igen sammenlignes resultatet med *allerede udsatte områder*, dette ses på Figur 36. Det fremgår heraf, at de udsatte områder i Kærby (nr. 6, 7, 8 og 9) og Tornhøjparken (nr. 13) er placeret i våde områder. Ligeledes er Vardevej (nr. 12) placeret i et område hvor der er relativ høj værdi for wetness index. Kolonihaveforeningerne Engen og Ådalen (nr. 5), Hasseris Enge (nr. 4), Ladegårdsvej (nr. 15) og Svendborgvej (nr. 14) er placeret tæt på områder med store værdier for wetness index. Udover de udpegede områder, så er stort set hele Kærby placeret i et område med relativ høj wetness index. Desuden har den vestlige del af Vestbyen inklusiv Væddeløbsbanen relativt høje værdier for wetness index.



Figur 34: Wetness index i Aalborg, hvor der ikke tages højde for forseglingsprocent.



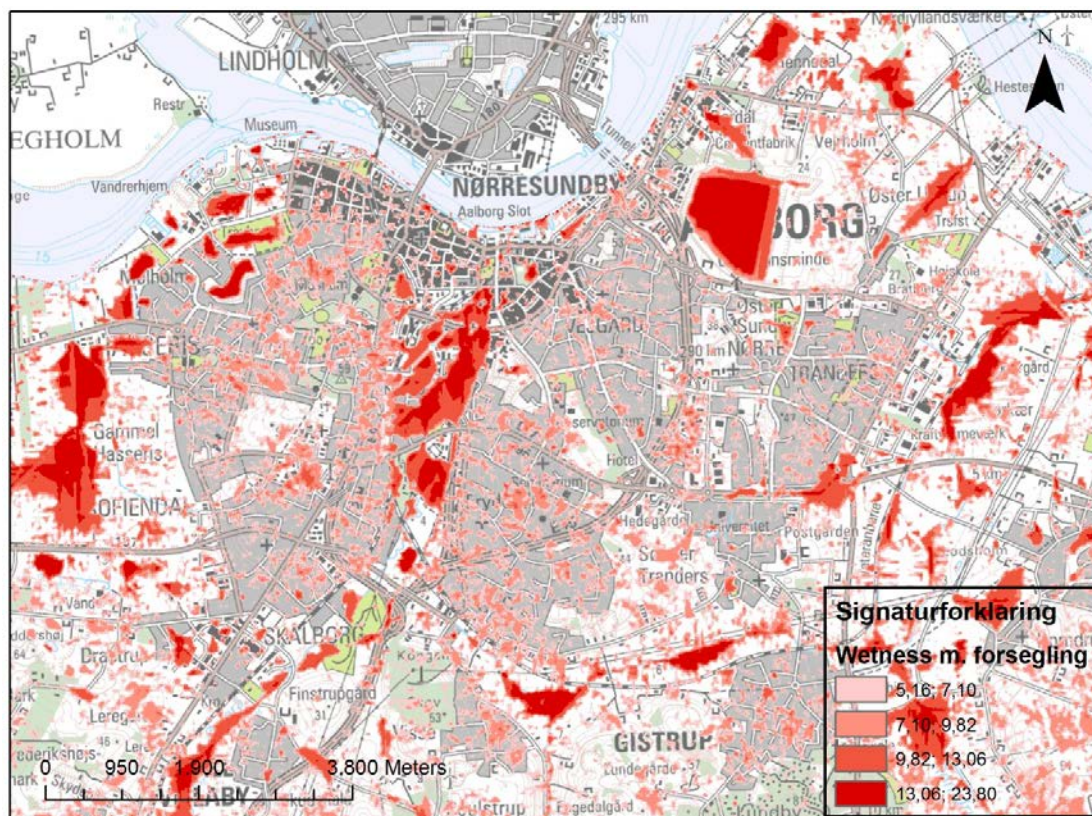
Figur 35: Uddrag af høje værdier for wetness index, hvor der ikke tages højde for forseglingsprocent.



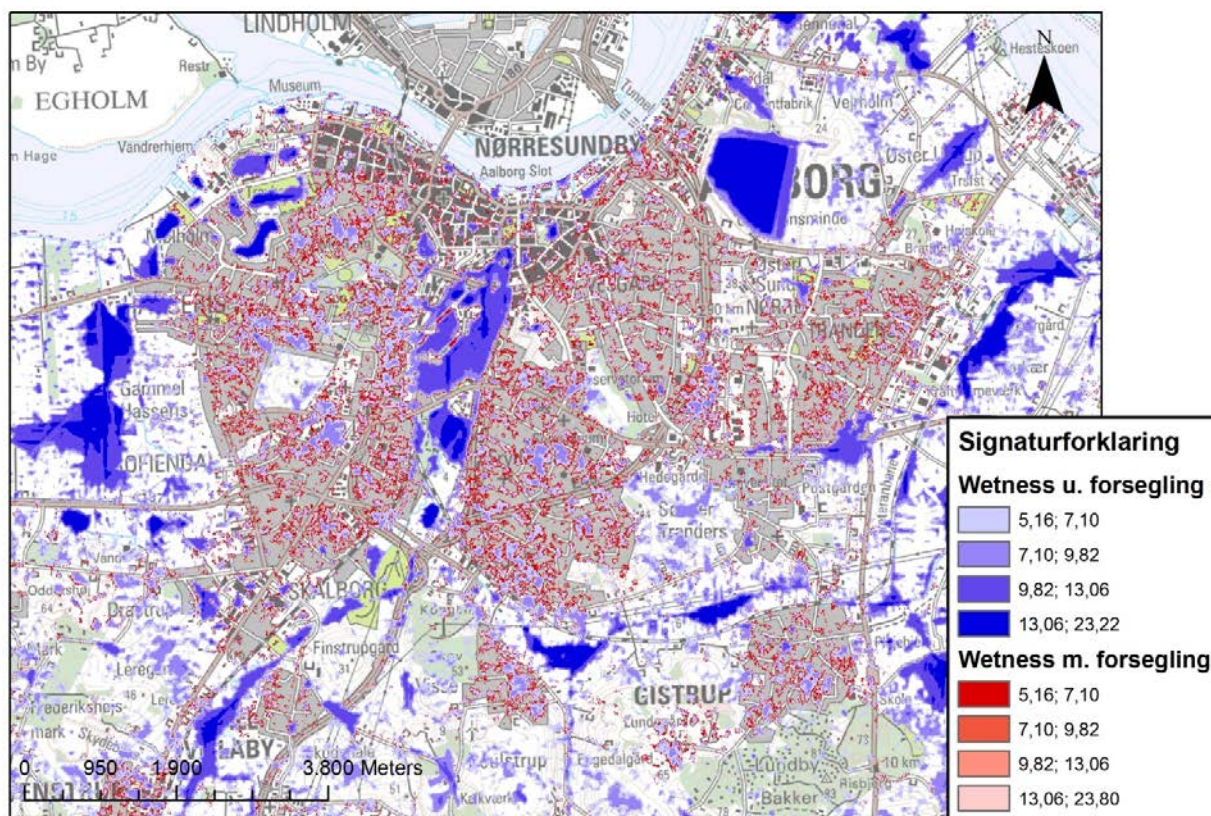
Figur 36: Sammenligning af wetness index og allerede udsatte områder fundet ved artikel research (rød) og interview (gul).

7.3 Wetness index med indførsel af forsegling

Beregningen af wetness index er i Figur 37 præciseret ved at medtage forseglingsprocenten i beregningen, således at overflader, som forseglor jorden for nedsivning af regnvand, har større overfladeafstrømning i forhold til ikke forseglede områder. Umiddelbart fremgår det af kortlægningen, at der nu er mange mindre områder, som har relativ stor wetness index i forhold til på Figur 35. De to kort (Figur 35 og Figur 37) er dog ikke helt sammenlignelige, da der i beregningen af wetness index uden forsegling ikke er indført et vægtningsraster i beregningen af Flow Accumulation, hvilket der er i beregningen af wetness index med forsegling. For at gøre de to kort sammenlignelige, vælges det derfor at tildele alle arealanvendelsestyper en forseglingsprocent på 15, hvilket var den værdi, der blev tildelt alle andre arealtyper med undtagelse af veje, jernbaner og bebyggelse, jævnfør Tabel 2, side 44. Ved at omklassificere wetness index med og uden forsegling efter samme værdier, fås resultatet visualiseret i Figur 38. Heraf ses det, at de to lag overlapper hinanden. Det fremgår videre af kortet, at wetness index med forsegling inddrager lidt større områder end wetness index uden forsegling. Samtidig er der flere våde områder ved inkorporering af forseglingsprocenten. Disse er dog af mindre geografisk omfang. Det ses desuden af Figur 38, at det primært er inden for byområdet, at der er forskel i de to lag. Endelig ses det af signaturforklaringen på Figur 38, at de største værdier for wetness index med forsegling er større end de største værdier for wetness index uden forsegling. Dette var et ventet resultat, da vægtningsrasteret i beregningen af wetness index med forsegling havde betydelig større forseglingsprocent på veje og bebyggede områder end wetness index uden forsegling.



Figur 37: Wetness index med forseglingsprocent inkorporeret.

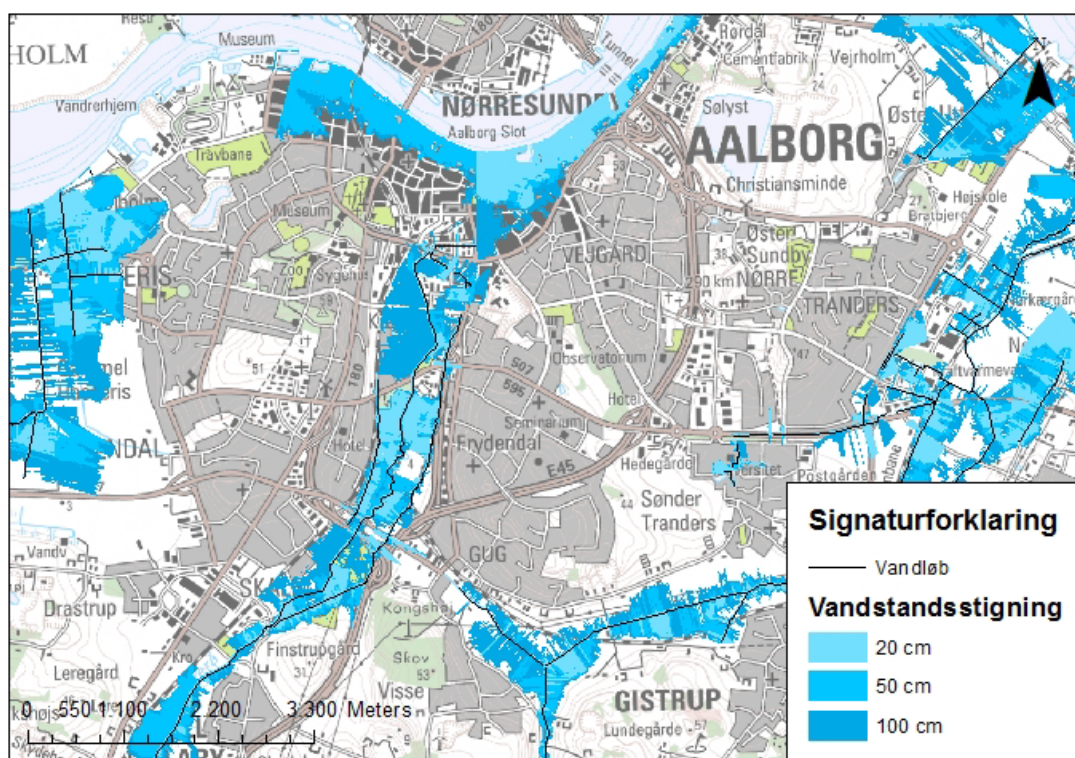


Figur 38: Sammenligning af wetness index med og uden forsegling.

7.4 Modellering af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb

Ved at anvende værktøjet Cost Distance på den lokalt differentieret højdeallokeringsmodellen er områder, som er i risiko for oversvømmelse, hvis vandstanden i vandløbene stiger 20, 50 og 100 centimeter og vandet derfor breder sig ud over omkringliggende terræn, kortlagt. Resultatet af kortlægningen fremgår af Figur 39. Af Figur 39 ses det, at de oversvømmelsestruede områder ligger i forbindelse med vandløbene, hvilket ligeledes var forventet, jævnfør modellen herfor. De oversvømmelsestruede områder er det vestligste af Hasseris, havneområdet, Kærby, Østerådal, den sydlige del af Skalborg, et mindre område ved universitetet og industrikvarteret i den østligste del af byen. Langs dele af vandløbene er der ikke nogen udbredelse ved nogle af vandstandsstigninger. Dette ses blandt andet øst for Østre Landgrøft, hvilket må skyldes, at vandløbet er beliggende 1 meter under terrænet øst for vandløbet, eller at diger med over en meters højde er placeret på østsiden af Østre Landgrøft.

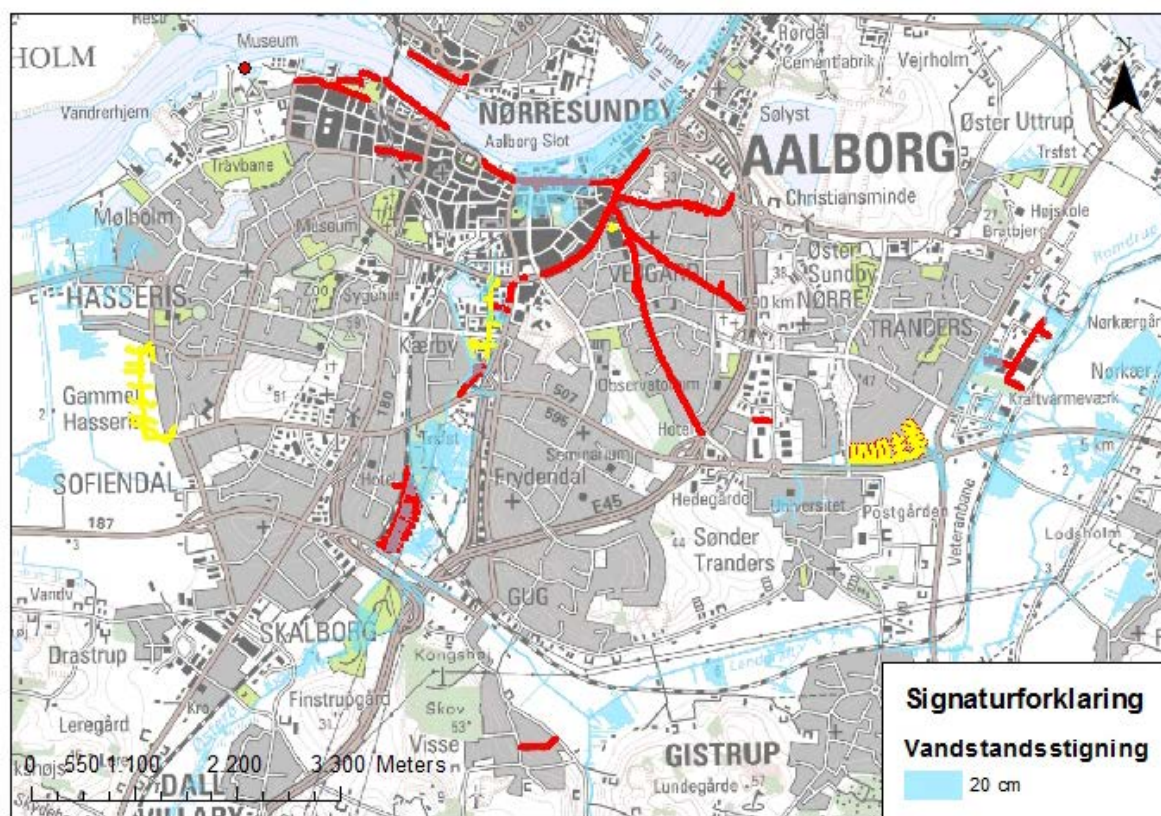
I Figur 40, Figur 41 og Figur 42 er de forskellige vandstandsstigninger visualiseret, hvorved vandstandsstigningens betydning kommer til udtryk. Ved sammenligningen af vandudbredelsen på Figur 40, Figur 41 og Figur 42 ses det, at *projektets kortlagte områder* vokser betydeligt i størrelse, som vandstandsstigningen stiger. De kortlagte områder er af mindre geografisk omfang ved en vandstandsstigning på 20 centimeter, mens en 100 centimeters vandstandsstigning oversvømmer områder af stort geografisk omfang. For bydelen Kærby ses det blandt andet, at denne først oversvømmes ved 1 meters vandstandsstigning.



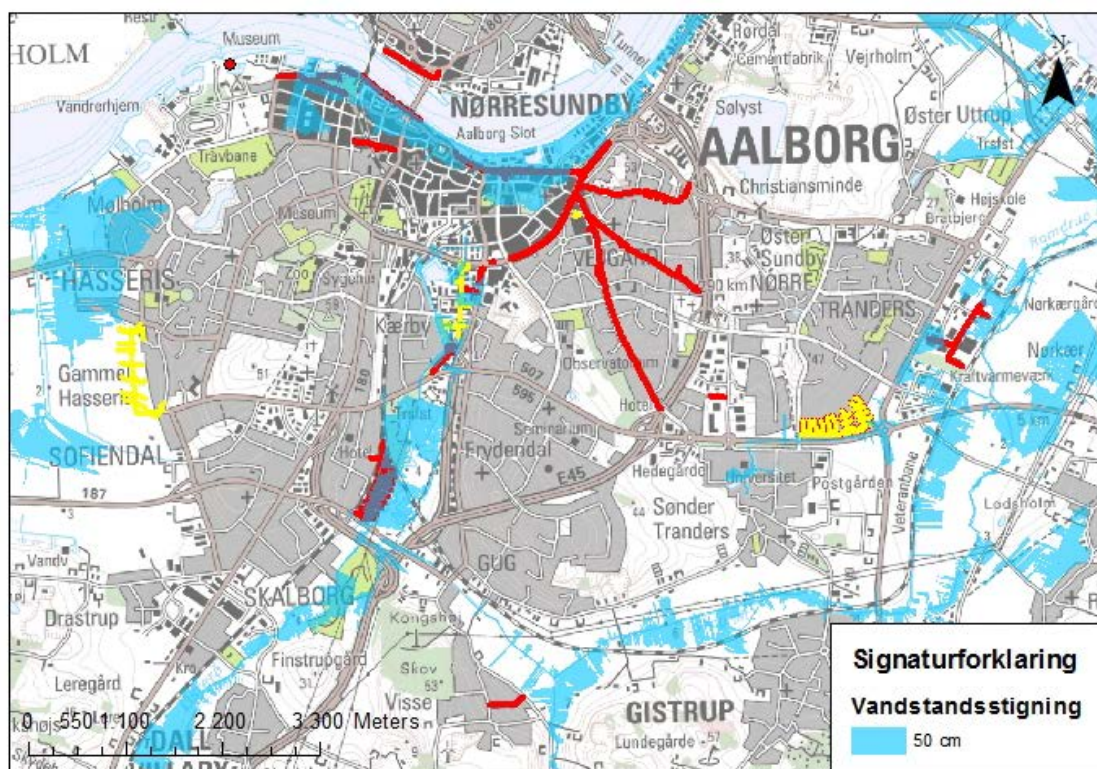
Figur 39: Vandudbredelse ved vandstandsstigninger på 20, 50 og 100 cm.

Der sammenlignes igen med de *allerede udsatte områder*, hvilke ligeledes fremgår af Figur 40, Figur 41 og Figur 42. Det ses af kortlægningen, at flere af de *allerede udsatte områder* ligger inden for de *projektets*

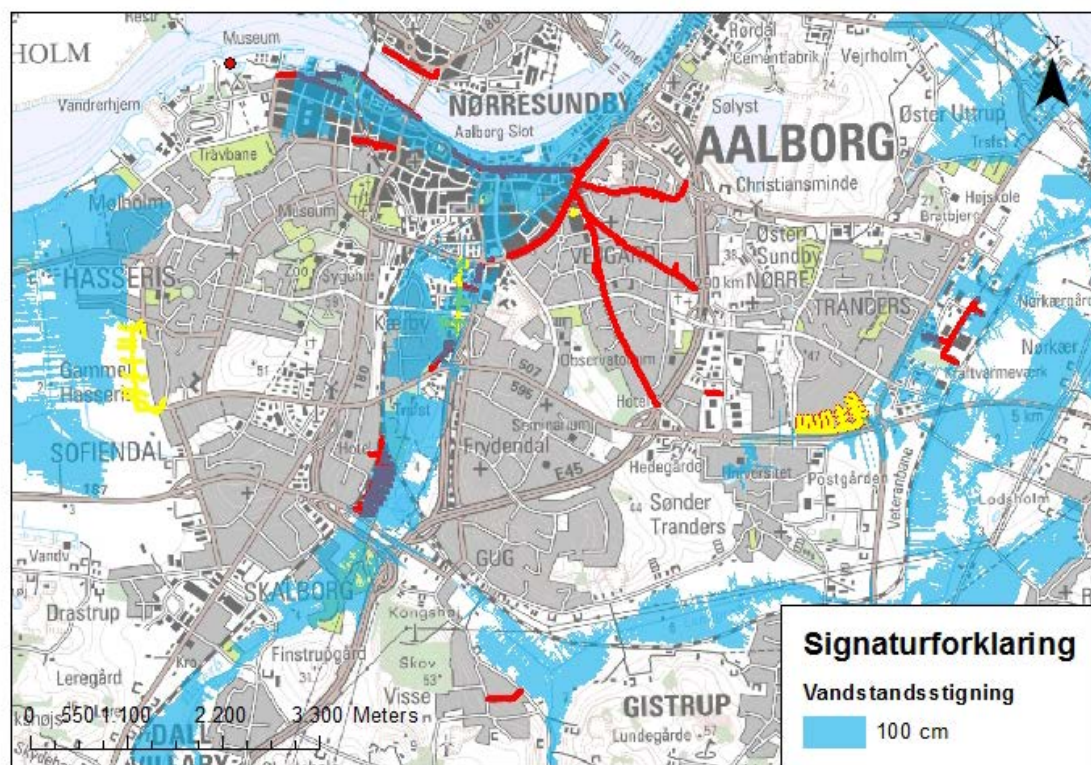
kortlagte områder. For en vandstandsstigning på 20 centimeter oversvømmes dele af kolonihaverne Engen og Ådalen (nr. 5) og mindre dele af områderne Ålykke (nr. 6), Håndværkervej (nr. 7), Tornhøjparken (nr. 13) og Svendborgvej (nr. 14). Desuden oversvømmes dele af havneområder, herunder Nyhavnsgrade. Dette skyldes dog en fejl i modellen, hvilken behandles i efterfølgende kapitel. Ved en vandstandsstigning på 50 centimeter oversvømmes nu yderligere Nållemagervej (nr. 8) og Kildely (nr. 9). Vandstandsstigningen på 100 centimeter oversvømmer ikke flere af de *allerede udsatte områder*, med undtagelse af områderne langs havnen, hvilke igen skyldes fejl i modellen. Til gengæld udbredes det oversvømmede område, hvilket bevirker, at Hasseri Enge (nr. 4) og Ladegårdsvej (nr. 15) grænser op til de oversvømmelsestruede områder.



Figur 40: Sammenligning af vandstandsstigninger på 20 cm og *allerede udsatte områder* fundet ved artikel research (rød) og interview (gul).



Figur 41: Sammenligning af vandstandsstigninger på 50 cm og allerede udsatte områder fundet ved artikel research (rød) og interview (gul).



Figur 42: Sammenligning af vandstandsstigninger på 100 cm og allerede udsatte områder fundet ved artikel research (rød) og interview (gul).

7.5 De oversvømmelsestruede områder

På baggrund af de tre modellers resultater, vil hovedresultaterne blive opsummeret i dette afsnit.

Det fremgår af ovenstående, at alle tre kortlægninger udpeger områder i forbindelse med de tre største åer i Aalborg; Hasseris Å, Øster Å og Romdrup Å. Sammenfaldende for alle kort er udpegningen af Kærby, landbrugsarealerne vest for Hasseris, området ved Tornhøjparken samt et mindre landbrugsområde nordøst for Nørre Tranders. I forhold til de områder, som blev udpeget ved artikel researchen og interview af afdelingsleder for vandmiljøafdelingen ved Aalborg Kommune; Michael Eilertsen, er det kun områderne i Kærby, herunder Ålykke (nr. 6), Håndværkervej (nr. 7), Nålemagervej (nr. 8) og Kildely (nr. 9), samt området ved Tornhøjparken (nr. 13), der blev udpeget ved alle fire analyser. Disse områder kan derfor siges at være i stor risiko for oversvømmelse, da områderne både er placeret lavt i terrænet, har høj værdi for wetness index og ligger tæt op ad vandløb.

Omvendt blev flere områder ikke kortlagt som oversvømmelsestruet i nogen af de tre analyser. Dette gjorde sig blandt andet gældende for Vejgaard området (nr. 10), hvor oversvømmelsen skyldtes underdimensionerede kloaksystemer, jævnfør BILAG I: ARTIKEL RESEARCH, og en topografisk modellering vil derfor ikke kunne udpege området som oversvømmelsestruet. Boligområdet i Hasseris Enge (nr. 4) og Ladegårdsvej (nr. 15) var ligeledes ikke placeret i de kortlagte risikoområder, men modsat Vejgaard-området, var disse to områder placeret tæt på både lavninger, våde områder og oversvømmende vandløb. På baggrund af at der er områder, der tidligere har været oversvømmet, men som ikke er lokaliseret i et oversvømmelsestruet område ved projektets analyser, kan det slutes, at de fire analyser ikke er fyldestgørende til at udpege *alle* oversvømmelsestruede områder i Aalborg.

Med afsæt i denne slutning vil de fire analyser i det følgende kapitel blive sammenlignet med hinanden og i forhold til forudgående forventninger og COWI's screening, præsenteret tidligere, og det ønskes på den baggrund at diskutere modellernes anvendelsespotentiale.

8. GIS-MODELLERNE ANVENDELSESPOTENTIALE

Formålet med dette kapitel er at kunne give en vurdering af modellernes anvendelsespotentiale både for hver enkelt model samt for modellerne samlet. For at kunne udarbejde denne vurdering, vil projektets GIS-modeller til rumlig analyse samt resultatet heraf blive diskuteret. Først betragtes datainputtets begrænsninger, som vil være gældende for alle tre modeller. Dernæst betragtes modellerne hver for sig, hvor begrænsninger, styrker og resultater diskuteres. I den forbindelse vil de enkelte modellers resultater blive sammenlignet med hinanden og med eksisterende kortlægning af oversvømmelsestruede områder i Aalborg (altså anden kortlægning). På baggrund af denne diskussion, samt forudgående analyse af overensstemmelsen mellem *projektets kortlægning* og *allerede udsatte områder*, gives en vurdering af de enkelte modellers anvendelsespotentiale. Afslutningsvist behandles samlingen af modellerne som ét resultat, og modellernes samlede begrænsninger og styrker diskuteres for til sidst at vurdere det samlede anvendelsespotentiale.

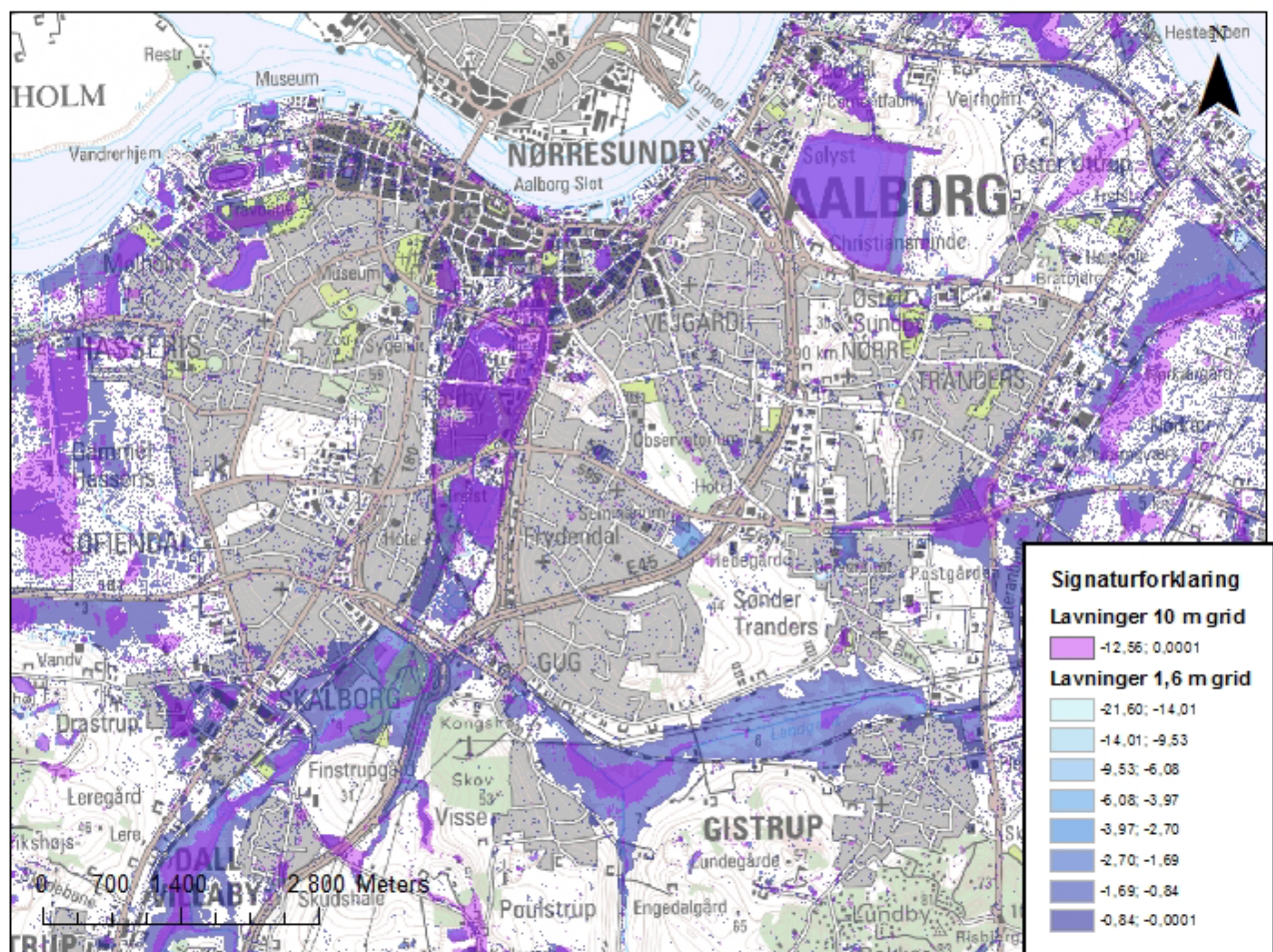
På baggrund af forudgående kapitel blev Kærby-området og dele af Tornhøjparken udpeget som højrisikozoner for oversvømmelse, da områderne både er lave, våde (høj værdi for wetness index) og beliggende tæt på vandløb. Det blev yderligere konkluderet, at de anvendte modelleringer af oversvømmelsestruede områder ikke kunne udpege alle *allerede udsatte områder*, hvorfor en udbygning af de anvendte modeller eller en supplerende med andre modeller derfor vil være nødvendig for at opnå mere virkelighedstro kortlægninger. Med projektets indsamlede viden om årsager til oversvømmelser var det dog ikke forventet, at modellerne ville kunne udpege alle områder, da det blandt andet vides, at kloaksystemer har stor indflydelse på, hvorvidt oversvømmelser opstår. Topografien, som projektets modeller er opbygget omkring, afgør derfor ikke oversvømmelsernes lokalitet alene.

8.1 Datainputtets begrænsninger

I analysens modellering af lavninger og vandstandsstigning bliver Danmarks højdemodel anvendt med en celledørrelse på 1,6 meter. Den indsamlede data er indhentet ved luftbåren LIDAR (Light detection and ranging), hvorudfra der fremstilles en punktsky, som udgør datagrundlaget for terrænmodellen. Punktskyen har en punkttæthed på 0,45 punkter per kvadratmeter, og ved interpolation bliver punkterne efterfølgende forenet. (Kort & Matrikelstyrelsen) (Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen) I denne interpolation sker der en metodisk fejl, da noget af geometrien vil blive mistet. Denne datafejl forøges yderligere, da eksempelvis træer og bygninger skygger for terrænet. Dette bevirker, at der kan være fejl i højdeinformationen.

En generaliseret højdemodel på 10 meter grid blev anvendt i beregningen af wetness index. Denne model blev anvendt, da den havde forholdsvis hurtig beregningshastighed og derfor var anvendelig i forhold til den computerkraft, der var til rådighed under størstedelen af projektperioden. Det ønskes nu at undersøge, hvor stor betydning valget af detaljeringsgrad i højdemodellen har. Til dette formål bestemmes lavninger i højdemodellen med 10 meter grid, og dernæst sammenlignes resultatet med *projektets kortlægning* af lavninger med højdemodellen på 1,6 meter grid. Sammenligningen heraf ses på Figur 43. Det fremgår af

kortet, at der er stor forskel på de lokaliserede lavninger i forhold til, hvilken højdemodel der anvendes. Højdemodellen med 1,6 meter grid kortlægger flere og geografisk større lavninger i terrænet end højdemodellen med 10 meter grid. Især ved Øster Å syd for Skalborg og ved Indkildestrømmen kortlægger 1,6 meter-modellen betydeligt større områder end 10 meter-modellen. Endvidere kortlægger højdemodellen med 1,6 meter grid mange mindre lavninger, som ikke registreres i højdemodellen med 10 meter grid. I forhold til de allerede udsatte områder, kortlægges kolonihaverne Engen og Ådalen (nr. 5) samt Vardevej (nr. 12) og Reberbansgade (nr. 3) i 1,6 meter-modellen, og ikke i 10 meter-modellen. Af sammenligningen kan det derfor slutes, at modeller til rumlig analyse giver forskelligartede resultater afhængigt af detaljeringsgraden i den anvendte højdemodel. Anvendelsen af højdemodellen med 10 meter grid gør, at terrænet forvanskes, og mindre højdeforskelle forsvinder. Det kan derfor ikke afvises, at beregningen af wetness index ville forbedres og dermed give et mere præcist resultat ved anvendelse af den mere detaljerede højdemodel med 1,6 meter grid.



Figur 43: Sammenligning af lavninger modelleret med 1,6 meter-højdemodellen og med 10 meter-højdemodellen.

I det følgende betragtes hver enkelt model og modellens resultater for derved at vurdere de enkelte modellers anvendelsespotentiale.

8.2 Lavninger

Ud fra topografien i landskabet blev der i projektet kortlagt lavningers placering i Aalborg-området. Dermed var forventningen, at kunne opnå et resultat, som kortlagte nogle af de *allerede udsatte områder* som oversvømmelsestruede. Da lavninger i terrænet ikke alene udgør en oversvømmelsesrisiko, var det dermed ikke forventet, at kortlægningen *kun* ville lokalisere områder, som ved store nedbørshændelser blev oversvømmet, da andre parametre ligeledes afgør risikoen.

8.2.1 Begrænsninger i datainput i forhold til kortlægning af lavninger

I modelleringen og kortlægningen af lavninger er der ikke fundet nogen begrænsninger i forhold til datainput. I produktspecifikationen for Danmarks højdemodel er det endvidere beskrevet, at modellen ikke indeholder datahuller, da disse er blevet lukket ved interpolation (KMS / Geografisk Infrastruktur, GIF@kms.dk, 2011). Derfor vil *projektets kortlagte* lavninger kun repræsentere nedsænkninger i terrænet og ikke datafejl. Højdemodellen er derfor anvendelig til lokalisering af lavninger i terrænet.

8.2.2 Modellens begrænsninger og styrker

Ved kortlægning af oversvømmelsestruede områder ud fra lokalisering af lavninger er modellen begrænset af, at der kun tages højde for topografi. Som behandlet tidligere, vil lavninger være i risiko for oversvømmelse, fordi områderne er lavt placeret i forhold til omkringliggende, hvorfor vand vil strømme hertil. Hvorvidt der opstår oversvømmelse i lavningen afhænger dog også af andre parametre. Først og fremmest vil grundvandsspejlets placering forud for nedbørshændelsen have betydning for oversvømmelsesrisikoen. Hvis grundvandsspejlet ligger dybere end lavningen, så er de øverste jordlag i lavningen ikke mættede med vand, og det nedbør, som føres til lavningen, vil dermed kunne trænge ned i jorden, frem for at ophobe sig på overfladen. Med hvilken hastighed nedbøren falder og deraf føres til lavningen samt jordtypens evne til at infiltrere vandmængderne afgør yderligere risikoen for oversvømmelser i lavninger. Kloaksystemets kapacitet under lavningen har ligeledes stor betydning for risikoen for oversvømmelse i området. Hvis kloaksystemet således kan rumme de tilstrømmende regnmængder og dermed kan aflede vandet, vil der ikke opstå oversvømmelser. Afstrømningens forgreningsmønster omkring lavningen har endvidere betydning for, hvor meget vand der føres til lavningen. Vandets bevægelse kan endelig være omfordelt ved eksempelvis etablerede pumpestationer eller dræn i form af kloakker, vandløb og kanaler (Rasmussen, Pedersen, & Larsen). Disse parametre udgør derfor mangler i modelleringen af lavninger, og derfor kan *Projektets kortlægning* udpege områder, som reelt ikke er i risiko for at blive oversvømmet.

Styrken ved kortlægning af lavninger, som metode til lokalisering af oversvømmelsestruede områder, er, at det er en forholdsvis simpel metode ved udførsel i ArcGIS. Som det ligeledes fremgik af modellens fremgangsmåde, var de potentielle områder lokaliseret efter brug af fire værktøjer i ArcGIS. Kortlægningen kan derfor udføres hurtigt. Modellens simplicitet gør desuden, at der ikke undervejs indføres værktøj, som forvansker virkeligheden, eller som modellerer hydrologiske strømninger unøjagtigt, modsat de efterfølgende modeller.

8.2.3 Diskussion af resultatet

Det fremgik af resultatet af *projektets kortlægning* af lavninger, at store dele af Aalborg-området er placeret i lavninger. Heraf var der ligeledes flere bydele, som blev kortlagt til at være placeret i lavninger, men som ikke indgår i de *allerede udsatte områder*. Dette er blandt andet den sydøstlige del af Skalborg og

et mindre område i universitetsområdet, jævnfør Figur 31, side 56. På baggrund af ovenover beskrevne begrænsninger i modellen er de kortlagte lavninger ikke nødvendigvis i risiko for at blive oversvømmet, da der er en række parametre, som modellen ikke tager højde for. Det kan dog ikke afvises, at områderne er i risiko for oversvømmelse, og at projektets forud indsamlet viden om, hvilke områder der tidligere har været udsat for oversvømmelser, ikke er dybdegående nok.

I *projektets kortlægning* af lavninger viste resultatet mange lavninger af mindre geografiske størrelse. Dette ses blandt andet i området nær Reberbansgade (nr. 3) på Figur 44. Det fremgår heraf, at mange mindre gårdanlæg er kortlagt som lavninger, hvilket, på baggrund af forudgående indsamlet viden om *allerede udsatte områder*, virker fejlagtigt, hvorfor der bør foretages en grov sortering i kortlægningen af lavninger. Umiddelbart kan denne sortering foretages ud fra geografisk størrelse, således at de mindste lavninger frasorteres. Dette er dog problematisk, da viadukten i Reberbansgade (nr. 3), hvilken indgik i de *allerede udsatte områder*, er geografisk lille, jævnfør Figur 44. Modellen bør derfor videreudvikles, så den giver et mere præcist resultat, og således frasorterer fejlagtige lavninger.



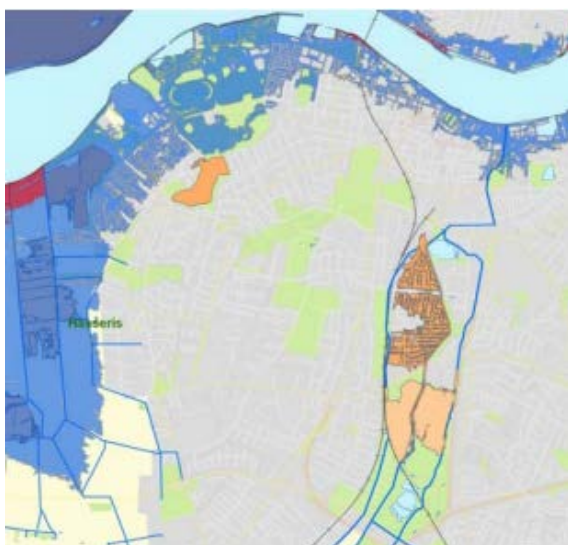
Figur 44: Projektets kortlægning af lavninger, hvor der er zoomet ind på området ved Reberbansgade (nr. 3). Ortofoto fra 2010: Ophavsrettigheder: COWI.

I forhold til sammenligningen mellem *projektets kortlagte lavninger* og de *allerede udsatte områder* er der god overensstemmelse, i og med at Reberbansgade (nr. 3), Engen, Ådalen (nr. 5), Ålykke (nr. 6), Håndværkervej (nr. 7), Nålomagervej (nr. 8), Kildely (nr. 9) Vardevej (nr. 12) og Tornhøjparken (nr. 13) er placeret i lavninger (se vejenes placering på Figur 30, side 55). I sammenligningen mellem *projektets kortlagte lavninger* og de *allerede udsatte områder* fremgår det yderligere, at Hasseris Enge (nr. 4), Vejgaard-området (nr. 10), Svendborgvej (nr. 14) og Ladegårdsvej (nr. 15) ikke er lokaliseret i lavninger. Hvorfor det slutes, at modellen ikke alene kan anvendes til lokalisering af oversvømmelsestruede områder.

For at vurdere resultatet af *projektets kortlægning* af lavninger sammenlignes med COWI's screening, som blev præsenteret i afsnit 2.4 Kortlægning af oversvømmelsestruede områder.

8.2.4 Projektets kortlægning kontra COWI's screening

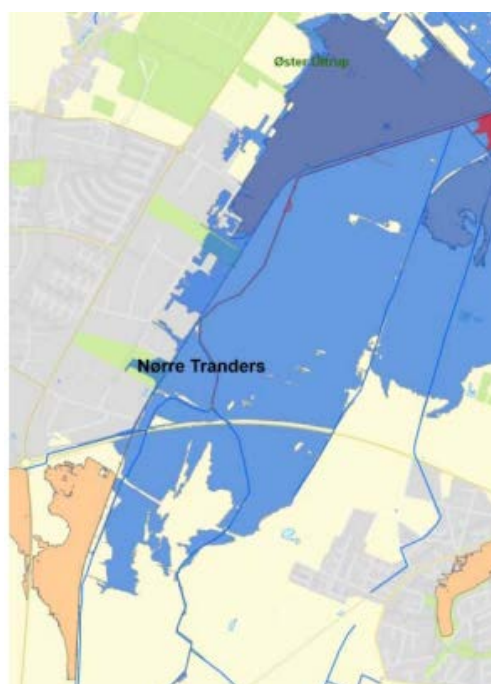
I COWI's screening udpeges lavninger i Aalborg Kommune, hvor der for de kortlagte lavninger skulle gælde, at arealet var minimum 1000 m², og at der fra lavningen ikke var et naturligt udløb. På trods af at der ikke er indført disse foranstaltninger i *projektets kortlægning* af lavninger, er de to kortlægninger interessante at sammenligne. Ved sammenligning af COWI's kortlagte lavninger i Kærby-området (Figur 46) med *projektets kortlagte* lavninger (Figur 48), ses det, at *projektets kortlagte* lavninger udgør et større geografisk område end i COWI's screening. De områder, som er kortlagt som lavning i *projektets kortlægning* i områderne kærby, Østerådalen og Tornhøjparken, men som ikke er kortlagt i COWI's screening, er markeret med rødt på Figur 48. Inden for den røde markering er Engen og Ådalen (nr. 5), Håndværkervej (nr. 7), Nålemagervej (nr. 8) og Kildely (nr. 9), beliggende, som ved artikel researchen og interview af medarbejder ved Aalborg Kommune blev fastsat som områder, der tidligere havde oplevet oversvømmelser. Ved Aalborg Øst ud mod Romdrup Å ses en tilsvarende situation. Her kortlægger COWI lavninger syd for Tornhøjparken (se Figur 45 og Figur 47), mens *projektets kortlagte* lavninger inddrager dele af Tornhøjparken (nr. 13), se markering med rød på Figur 48. Tornhøjparken blev ved artikel researchen udpeget som et område, der tidligere har været udsat for oversvømmelser. Det kan på baggrund af denne sammenligning slutes, at *projektets kortlægning* af lavninger er bedre til at lokalisere oversvømmelsestruede områder end COWI's screening.



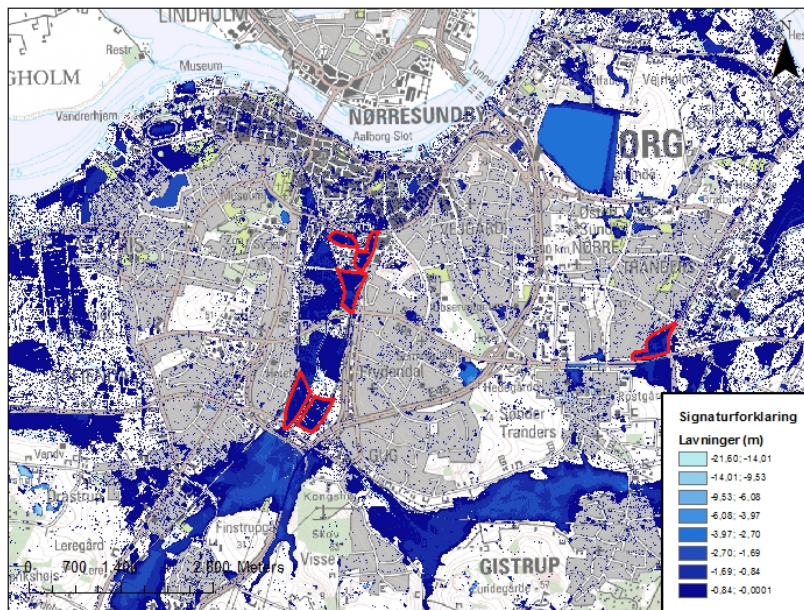
Figur 46: COWI's kortlægning af oversvømmelsestruede områder ved vandstandsstigning i havet på 2,42 m (blå) og lavninger (orange). Kortet viser Hasseris Enge i vest og lavningerne visualiseret til højre for midten er Kærby-området. Fra (Aalborg Kommune, 2011, s. 40).



Figur 47: COWI's kortlægning af lavninger i Aalborg. Fra (Aalborg Kommune, 2011, s. 36).



Figur 45: COWI's kortlægning af oversvømmelsestruede områder ved en vandstandsstigning i havet på 2,42 m (blå) og lavninger (orange). Kortet viser det østligste af Nørre Tranders med Romdrup Å til højre herfor. Fra (Aalborg Kommune, 2011, s. 44).



Figur 48: Projektets kortlægning af lavninger. De røde polygoner viser, hvad der blev kortlagt i projektets modellering i Kærby, Østerådalen og i Tornhøjparken, og som ikke blev kortlagt i COWI's screening.

8.2.5 Modellens anvendelsespotentiale

Med højdemodellen som eneste datainput er det oplagt at kortlægge lavninger i terrænet for at undersøge, hvilke områder, der er i risiko for at blive oversvømmet. Højdemodellen er anvendelig til dette formål, da modelleringen af lavningen kun bestemmes af topografien, hvorfor selve modelleringen ikke er behæftet med usikkerheder eller fejl, som det er gældende for de efterfølgende modeller.

Det vurderes på baggrund af analysen og diskussionen heraf, at modellering af lavninger er anvendelig, hvis der ønskes at opnå overblik af, hvor overfladeafstrømning *kan* konvergere og dermed udpege nogle af de potentielt oversvømmelsestruede områder. For at kunne fastsætte, hvorvidt de udpegede lavninger er i risiko for oversvømmelse, er det dog nødvendigt at sammenligne med yderligere analyser og viden. En udpeget lavning er ikke nødvendigvis i risiko, da blandt andet grundvandsspejlets placering, kloakforhold, afstrømningsforhold og etablerede dræn vil kunne afgøre, om vandet ophobes i lavningen. Resultatet af *projektets kortlægning* af lavninger lokaliserede yderligere mange små geografiske områder som lavninger, hvorfor en specificering eller sortering af resultatet er nødvendig forud for en anvendelse. På baggrund heraf kan det slutes, at det er nødvendigt at undersøge de kortlagte lavninger yderligere for at vurdere den reelle risiko.

Omvendt er det blevet behandlet, at en kortlægning af lavninger ikke lokaliserer alle oversvømmelsestruede områder, da ikke alle *allerede udsatte områder* var lokaliseret i lavninger. Det vil derfor være nødvendigt at supplere kortlægningen af lavninger med andre modeller.

8.3 Wetness index uden indførsel af forsegling

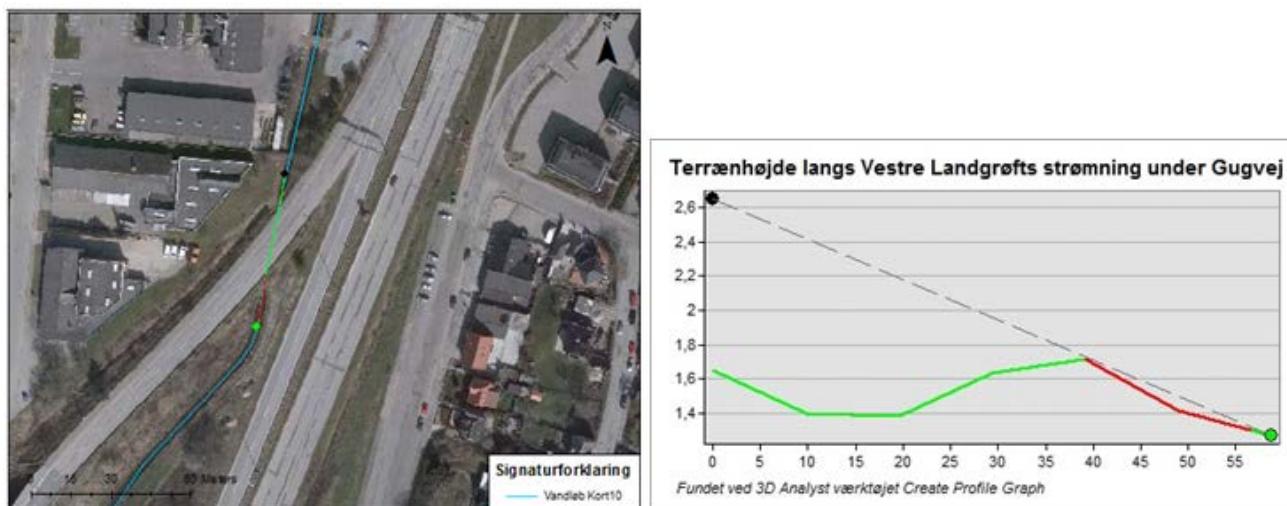
Da beregningen af wetness index, både inddrager topografi, afstrømningsmønstre og afstrømningens størrelsesorden ud fra oplandets størrelse, hvormed der er sket en forøgelse af inddragne parametre i forhold til modelleringen af lavninger, var det forud for modelleringen forventet, at wetness index ville

være bedre til at lokalisere de *allerede udsatte områder* og dermed være mere anvendelig til at kortlægge oversvømmelsestruede områder i Aalborg.

8.3.1 Begrænsninger i datainput i forhold til kortlægning af wetness index

Som datainput er den generaliserede højdemodel med 10 meter grid anvendt. Det er tidligere blevet behandlet, at der er stor forskel på resultatet af modelleringen af lavninger alt efter hvilken højdemodel, der vælges som datainput. Her gav anvendelsen af 1,6 meter-højdemodellen et mere detaljeret resultat, hvor flere af de *allerede udsatte områder* blev kortlagt til at være placeret i lavninger end ved modelleringen med den generaliserede højdemodel med 10 meter grid. Det kan derfor ikke afvises, at en anvendelse af højdemodellen med 1,6 meter celledørrelse ville have givet et mere virkelighedsnært billede af wetness index og dermed de oversvømmelsestruede områder.

I *projektets kortlægning* af wetness index er modelleringen begrænset af, at højdemodellen ikke indeholder terrænets kote under alle brodæk. Dette bevirker, at modellering af Flow Accumulation ikke afspejler den korrekte afstrømning i terrænet. Et eksempel på dette er visualiseret i Figur 49, med tilhørende graf af vandløbets kote målt på højdemodellen med 10 meter grid. Heraf ses det, at brodækket ikke er fjernet i højdemodellen, hvorved den beregnede Flow Accumulation ikke vil forløbe samme vej som Vestre Landgrøft. Generelt ses det af modelleringen af Flow Accumulation sammenlignet med vandløb fra Kort10, at disse afviger betydeligt fra hinanden. Da wetness index er direkte bestemt ud fra Flow Accumulation, betyder dette, at modelleringen af wetness index vil indeholde fejl, da områder, som ikke har høj overfladeafstrømning eller underjordisk gennemstrømning kan blive kortlagt som risikoområde, mens de reelle områder ikke lokaliseres. Manglende kote under brodæk i højdemodellen betyder derfor, at Flow Accumulation modelleres ukorrekt i modelleringen af wetness index.



Figur 49: Vestre Landgrøften i Kærby, som her går under Gugvej. Ved hjælp af 3D Analyst værktøjet Create Line of Sight er der tegnet en lige linje langs med vandløbet, hvorved vandløbets kote, ud fra højdemodellen med 10 m grid, aflæses på strækningen ved 3D Analyst værktøjet Create Profile Graph. Ortofoto fra 2008: Ophavsrettigheder: COWI.

8.3.2 Modellens begrænsninger og styrker

På trods af at modelleringen af wetness index medtager flere parametre end i modelleringen af lavninger, mangler der stadig parametre at inddrage i kortlægningen for at opnå et virkelighedstro resultat. Der bliver ikke bliver taget højde for nedsivning til grundvandet, hvorfor al nedbøren vil strømme som overfladevand

eller underjordisk gennemstrømning. Dette bevirker, at de fremstillede kort ikke er realistiske, da nedsivningen til grundvandet har betydning for mængden af hurtig afstrømning. Ved længerevarende og kraftige nedbørshændelser, hvor jorden mættes af vand og kloaksystemerne fyldes, kan der opstå situationer, hvor der finder minimal nedsivning sted, dermed bliver det udarbejdede kort af wetness index mere anvendelig.

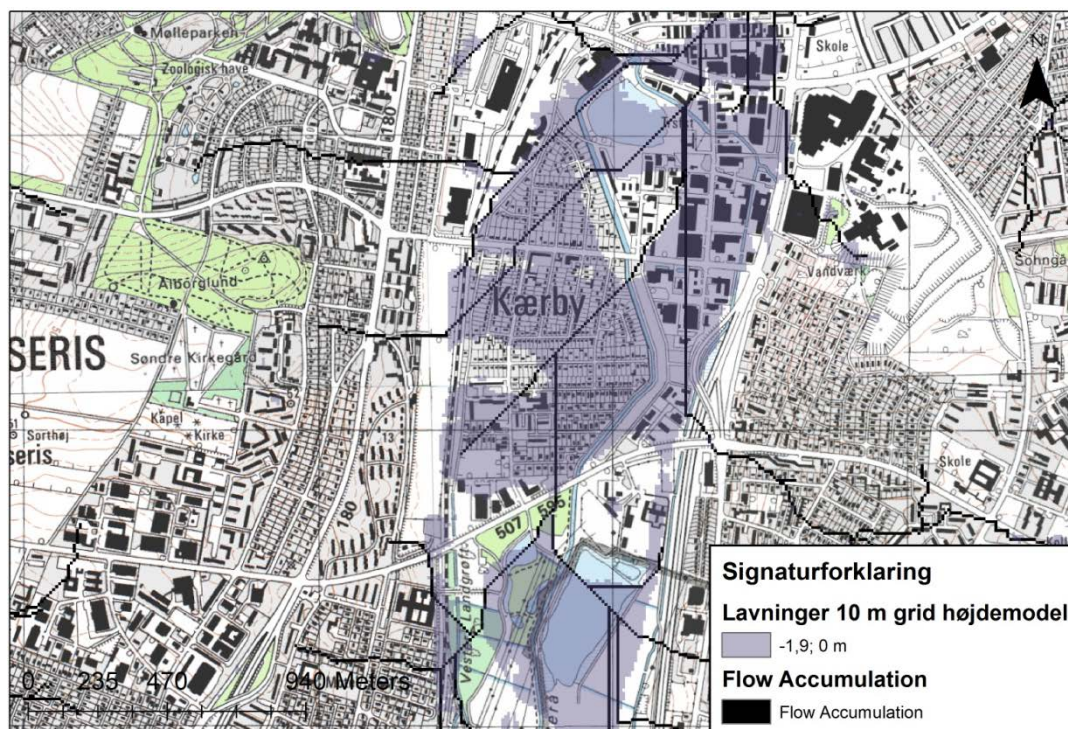
I beregningen af Flow Accumulation blev der tilføjet en enhed vand til hver celle. Det udarbejdede kort tager dermed ikke højde for varierende nedbørsmængder i terrænet. Da der vil være varierende nedbørsmængder inden for oplande (Henriksen, Nyegaard, Kern-Hansen, & Ovesen), afspejler modelleringen dermed ikke et virkelighedstro afstrømningsmønster.

Som beskrevet i Kapitel 6. GIS-MODELLER TIL RUMLIG ANALYSE er beregningen af wetness index mindre anvendelig i flade terræner, hvor det ikke er muligt at finde den præcise afstrømning ud fra højdemodellen i ArcGIS. Værdien for wetness index er dog netop relevant i flade områder, da disse områder kan være i risiko for oversvømmelse. Der findes en metode i ArcGIS til at fastlægge afstrømningsmønsteret i flade områder, men da metoden herfor vurderes at være for tidskrævende i forhold til projekts tidsramme, er det ikke valgt at medtage den i projektet. Beskrivelsen af metoden herfor belyses i stedet i projektets perspektivering: Kapitel 10. VIDEREUDVIKLING AF MODELLERNE.

Det vælges at fylde lavninger forud for beregningen af wetness index. Dette er nødvendigt for at opnå sammenhængende afstrømningsmønstre i modelleringen af Flow Accumulation. I naturen vil en afstrømning til en lavning bremse afstrømningen, hvorved lavningen vil fyldes med vand. Først når lavningen er fyldt, vil vandet kunne strømme videre mod udløbet. Beregningen af Flow Accumulation beskriver, hvor meget vand hver enkelt celle modtager fra celler opstrøms inden for samme opland. At det vælges at fylde lavningen ved brug af værktøjet Fill i modelleringen betyder derfor, at den beregnede Flow Accumulation ikke afspejler det virkelige afstrømningsmønster. I lavningen burde den beregnede Flow Accumulation derfor være større, mens den på den anden side af lavningen (nedstrøms) ville være mindre, hvis Flow Accumulation afspejlede den naturlige afstrømning.

I flade områder og i lavninger (når lavninger fyldes, vil hældningen i området efter fyldningen være lig nul) vil Flow Accumulation, som tidligere beskrevet ikke kunne beregne den præcise afstrømning. I stedet findes den korteste vej over området, hvilket vil være en lige linje. Dette er illustreret for Kærby-området på Figur 50, hvoraf det ses, at den beregnede Flow Accumulation er lige linjer over områder med lavninger.

På baggrund af ovenstående beskrevne problemer med beregningen af Flow Accumulation sammen med det faktum, at beregningen af Flow Accumulation ikke tager højde for etablerede dræn eller pumpestationer i lavninger og ligeledes ikke inddrager nedbørsmængder, kan det slutes, at der er en række fejl forbundet med beregningen. Af Figur 50 fremgår åløbene i Kærby af baggrundskortet, og heraf ses det, at der er stor forskel mellem den beregnede Flow Accumulation og åernes placering. Disse fejl i beregningen af Flow Accumulation bevirker derfor, at det modellerede afstrømningsmønster i nogle områder afviger betydeligt fra den reelle afstrømning i terrænet.



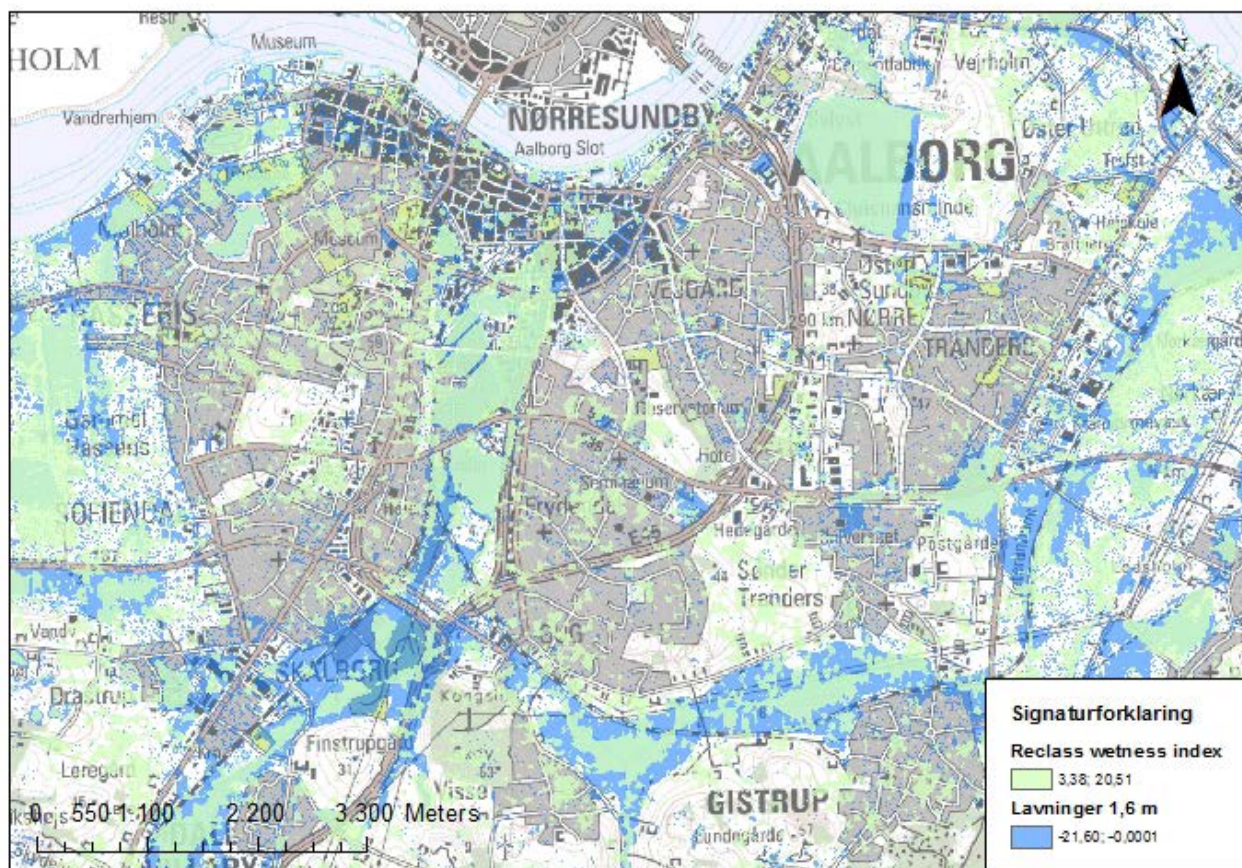
Figur 50: Viser hvordan Flow Accumulation i lavninger finder korteste vej ved en lige linje.

I beregningen af wetness index fås et resultat, som har store udsving mellem høje og lave værdier for wetness index indenfor små afstande, hvorfor det vælges at udglatte resultatet ved anvendelse af værktøjet Focal Statistics. I anvendelsen af dette værktøj sættes hver enkelt celle til en værdi beregnet ud fra middelværdien af værdien på de celler, som findes i en cirkel omkring den pågældende celle. Der er dermed tale om en forvanskelse af resultatet, hvormed der vil gå informationer tabt. Hvor problematisk, denne forvanskelse er, afhænger af, hvordan resultatet af wetness index skal anvendes. I en udpegning af enkelte adressers værdi for wetness index vurderes det uhensigtsmæssigt at gøre brug af værktøjet Focal Statistics.

Styrken ved modellering af wetness index er, at kortlægningen udpeger oversvømmelsestruede områder baseret på hældning og strømningsmønstre. Derved er der tale om en præcision af modelleringen af lavninger. Lavningers risiko for oversvømmelse er netop afhængig af, hvor stor afstrømningen til lavningen er.

8.3.3 Diskussion af resultatet

På Figur 51 er wetness index kortlagt sammen med de lokaliserede lavninger. Det ses af resultatet, at der er god overensstemmelse mellem de to modeller. For de store lavninger langs åløbene ses det, at wetness index ikke udgør et lige så stort geografisk område. Dermed præciserer wetness index kortlægningen af lavninger. De områder, som de to kortlægninger har til fælles, kan således karakteriseres som lavninger, hvor der strømmer overfladisk afstrømning til, og dermed præciseres kortlægningen af lavninger, da det netop blev afklaret i forudgående afsnit, at ikke alle lavninger er oversvømmelsestruet, hvis ikke der er en afstrømning til området. Det ses desuden af Figur 51, at der er flere områder, som karakteriseres som våde, men som ikke er lavninger, her må området derfor være fladt eller have stor tilstrømning af vand fra omkringliggende arealer.



Figur 51: Sammenligning af lokaliserede lavninger og wetness index.

På baggrund af resultatet af *projektets kortlægning* af wetness index i forhold til de *allerede udsatte områder* blev Håndværkervej (nr. 7), Nålemagervej (nr. 8), Kildely (nr. 9), Vardevej (nr. 12) og Tornhøjparken (nr. 13) kortlagt i områder med høj værdi for wetness index. I forhold til *projektets kortlægning* af lavninger er der ikke sket en forbedring i overensstemmelsen mellem *projektets kortlægning* og *allerede udsatte områder*, da Engen og Ådalen (nr. 5) og Svendborgvej (nr. 14) yderligere var placeret i lavninger i *projektets kortlægning* heraf.

8.3.4 Modellens anvendelsespotentiale

På baggrund af forudgående sammenligning af lavninger modelleret med højdemodellen med 10 meter grid og med 1,6 meter grid vurderes det, at det er nødvendigt at anvende 1,6 meter højdemodellen som datainput frem for den anvende 10 meter grid-højdemodel i modelleringen af wetness index. Derved formodes det, at der kan opnås et mere virkelighedsnært billede, som desuden lokaliserer flere af de *allerede udsatte områder* i områder med høj wetness index.

Det er blevet behandlet, at manglende højdeinformationer under broer medfører en forkert modellering af afstrømningsforholdene (Flow Accumulation). For at undgå denne fejl, vil det være nødvendigt at videreudvikle højdemodellen ved at fjerne alle brodæk og ved interpolation beregne terrænets kote under brodækket ud fra det laveste nærliggende terræn. I beregningen af strømningsmønsteret var der yderligere en fejl, da beregningen af Flow Accumulation kræver, at lavninger i terrænet fyldes inden. Fyldningen af lavningen bevirker, at Flow Accumulation bliver modelleret til at tage den korteste vej over lavningen. For

at undgå denne fejl er det nødvendigt at videreudvikle modellen, således at afstrømningen påtvinges i den rigtige retning. En mere virkelighedstro modellering af wetness index ville derfor kræve en videreudvikling af højdemodellen og en udbygning af modellen til bestemmelse af Flow Accumulation.

Da modelleringen af wetness index mangler parametrene; fordampning, nedsivning og nedbør, vurderes det, at modellen ikke kan bestemme risikoområdets størrelsesomfang. Dette argument bekræftes ved, at det afslutningsvist vælges at uddrage udvalgte værdier for wetness index, som anvendes til at lokalisere de oversvømmelsestruede områder. Derved vælger jeg altså selv, hvilke værdier af wetness index, som skal uddrages i *projektets kortlægning*, og dermed for hvilke værdier af wetness index, der er risiko for oversvømmelse. Denne viden sidder jeg imidlertid ikke inde med. Det skal derfor bemærkes, at metoden ikke levere et resultat, som umiddelbart kan fortolkes eller bringes i overensstemmelse med virkeligheden. På baggrund heraf kan det slutes, at projektets modellering af wetness index, frem for at udpege risikoområder, nærmere illustrerer forholdene imellem forskellige områders wetness index. For at vurdere den reelle risiko i et område, kræver det yderligere forskning, og det er i den forbindelse nødvendig at indsamle viden om, for hvilke værdier af wetness index, der er tale om en reel risiko for oversvømmelse.

Ligesom det gjorde sig gældende i modelleringen af lavninger, vil det være nødvendig efter en udpegning af områder med høje værdier for wetness index, at undersøge det udpegede område yderligere. Derved skal kloakforhold, og en eventuel etablering af dræn eller pumpestationer undersøges i området for at vurdere risikoen.

8.4 Wetness index med indførsel af forsegling

Ved at indføre forseglingsprocenten var det målet at kunne skabe en model, som afspejlede afstrømningsforholdene mere virkelighedsnært. Det er tidligere blevet behandlet, at forseglingsprocenten har stor indflydelse på afstrømningsmønsteret og forholdet mellem overjordisk afstrømning og nedsivning. Derfor var der en forventning om, at en inddragelse af forseglingsprocenten i modellen ville gøre resultatet mere anvendeligt.

8.4.1 Begrænsninger i datainput i forhold til modellering af wetness index med forsegling

Ved indførsel af forseglingsprocent til bestemmelse af Flow Accumulation er metoden begrænset af, at der anvendes et arealanvendelseskort fra 1999. Dette vil betyde, at bebyggelse af boligkvarterer, veje eller nedrivning af disse arealtyper i perioden 1999-2012 ikke er medtaget beregningen af wetness index med forsegling. Arealanvendelseskortet blev valgt, da det er et sammenhængende kort, som nemt og uden lang beregningshastighed kunne konverteres til raster med den ønskede cellestørrelse. Det blev forsøgt at anvende arealtyper fra Kort10, men fremgangsmåden og især beregninger i ArcGIS var meget tidskrævende, da det var nødvendigt at samle dataene til et sammenhængende raster kort, hvilket var input krav for vægtningsrasteren.

8.4.2 Modellens begrænsninger og styrker

Inddragelsen af arealanvendelseskortet giver en målestoksmæssig udfordring, da arealanvendelseskortet har målestoksforholdet 1:25.000, mens højdemodellen har 1:10.000. Arealanvendelseskortet bliver konverteret til raster, hvor cellestørrelsen angives til 10 meter, hvorved forholdene stemmer overens i den efterfølgende beregning. Men ved konverteringen sker der en generalisering og en destruktion af geometrien, da nogle arealtyper vil blive omfordelt. I konverteringen bliver cellerne tildelt arealtype efter

hvilken feature, cellens centrum tilhører (ArcGIS Desktop Help). Generaliseringen giver derved datafejl, hvilke vil være størst i områder med heterogen arealanvendelse, hvorved modellen bliver mindre præcis.

For beregningen af wetness index med indførsel af forseglingsprocent gælder desuden samme begrænsninger som i modelleringen af wetness index uden forseglingsprocent.

Styrken ved modellering af wetness index med forseglingsprocent frem for uden forseglingsprocent er, at der inddrages en ekstra parameter i modellen, nemlig forseglingsprocenten. Endvidere er det en parameter, som nemt kan videreføres i modellering af wetness index med forseglingsprocent i andre byområder i landet, da det ikke kræver videre undersøgelse af det pågældende områdes arealanvendelse, da denne netop er kortlagt i det anvendte arealanvendelseskort fra 1999.

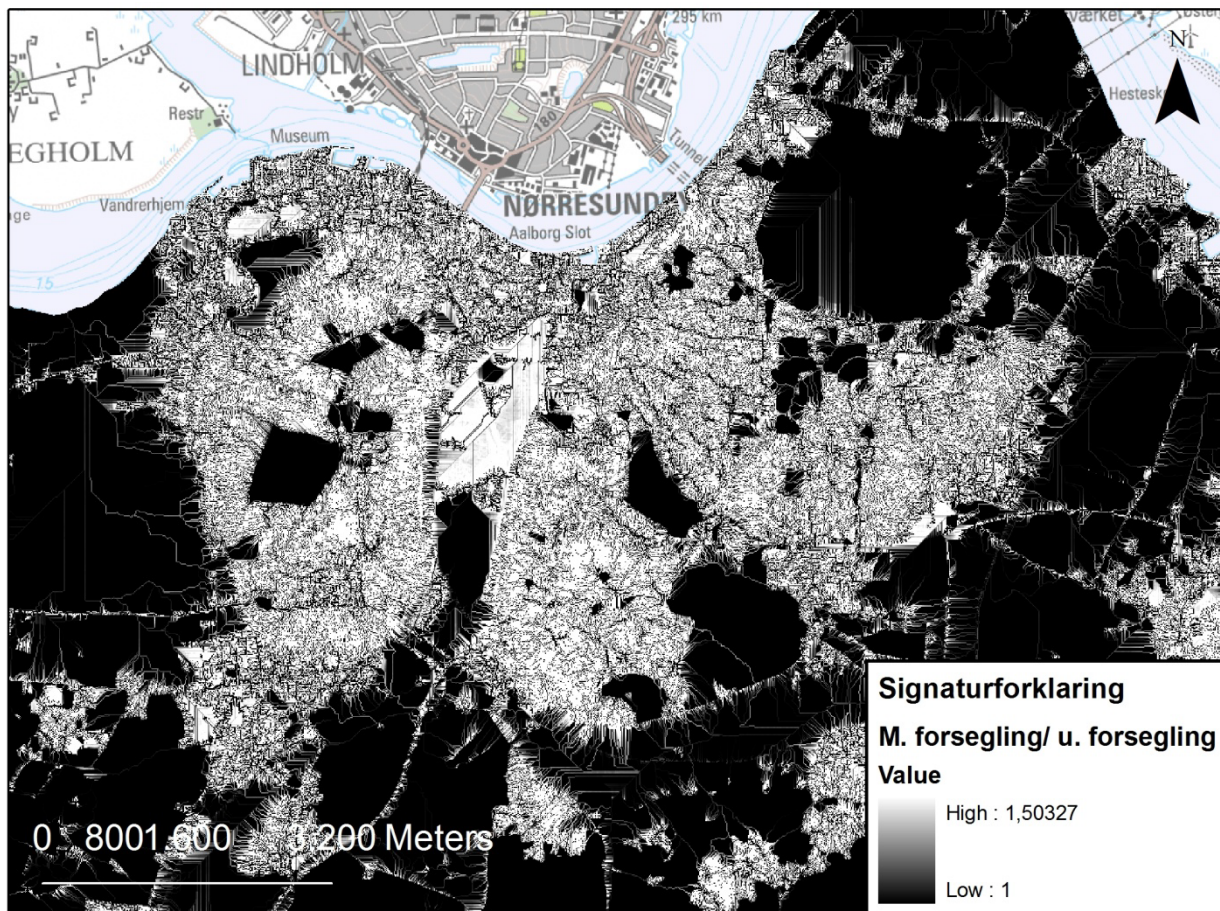
8.4.3 Diskussion af resultatet

I afsnit 7.3 Wetness index med indførsel af forseglingsprocent blev resultatet af wetness index med og uden indførsel af forseglingsprocent sammenlignet. Ved denne sammenligning, viste resultaterne sig at afvige fra hinanden. De områder med høj wetness index med inkorporering af forseglingsprocent var større i geografisk omfang og kortlægningen viste flere mindre områder med høj wetness index. Det skal dog påpeges, at dette kun gjorde sig gældende inden for byområdet. Forseglingsprocenten bevirker dermed, at de våde områder (høj wetness index) bliver større, og der er flere områder, som er i risiko for oversvømmelser i byområdet.

Forskellene mellem wetness index med forseglingsprocent og uden forseglingsprocent inkorporeret vil nu blive undersøgt nærmere, hvormed Figur 52 illustrerer forholdet mellem wetness index med forseglingsprocent og uden forseglingsprocent, beregnet i Raster Calculator på følgende måde:

$$\text{Raster Calculator} = \frac{\text{Wetness index med forseglingsprocent}}{\text{Wetness index uden forseglingsprocent}}$$

De høje værdier på Figur 52 illustrerer således de områder, hvor der er stor forskel på resultatet af wetness index med forseglingsprocent og uden forseglingsprocent, mens værdier lig 1, svarer til områder, hvor wetness index er ens med og uden forseglingsprocent. Det fremgår af Figur 52, at de største værdier findes i byområdet og ved veje, hvilket også var forventet, jævnfør Tabel 2, side 44. Det fremgår af Figur 52, at der er enkelte områder, hvor forskellene er størst. Dette gør sig blandt andet gældende for Kærby området og Tornhøjparken. Figur 52 beskriver, hvor forseglingsprocenten har størst indflydelse på risikoen for oversvømmelse. Derfor bevirker forseglingsprocenten, at risikoen for oversvømmelse forøges i blandt andet Kærby og Tornhøjparken (nr. 13), da der her vil være større overfladisk afstrømning.



Figur 52: Forholdet mellem wetness index med forsegling og wetness index uden forsegling.

8.4.4 Modellens anvendelsespotentiale

Det bør, forud for en anvendelse af modellen af wetness index med forseglingsprocenten indført, vurderes, om arealanvendelseskortet fra 1999 er fyldestgørende og præcis i forhold til at beskrive byområdets arealanvendelse. Har der været meget byfornyelse siden 1999, bør det derfor overvejes, om der er behov for et nyere arealanvendelseskort.

Ligesom for modellering af wetness index uden forsegling, giver modelleringen af wetness index med forsegling ingen informationer, om for hvilke værdier af wetness index, der er tale om en reel risiko. Der er derfor stadig behov for en yderligere analyse af værdierne for wetness index i forhold til oversvømmelsesrisikoen forud for en anvendelse af modellen i byplanlægningen.

Det har vist sig, at forseglingen har stor indflydelse på risikoen for oversvømmelser i byområdet. Den overfladiske afstrømning forøges dermed i byområder, hvorved risikoen for oversvømmelser i byområder med stor tilstrømning forøges. Det kan slutes, at wetness index med inddragelse af forseglingsprocenten forbedrer resultatet i byområder, mens inddragelsen af forsegling relativiserer oversvømmelsesrisikoen i landområder uden bymæssig bebyggelse.

8.5 Modellering af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb

Da det er blevet afklaret, at oversvømmelserne i Kærby forårsages af et stigende pres på Øster Å fra et stort opland, var det forud for *projektets kortlægning* forventet, at en modellering af vandstandsstigning og

vandudbredelse ville kunne afspejle, hvilke områder der udsættes ved oversvømmelser fra åen. Samtidig var det muligt at undersøge om Hasseris Enge (nr. 4) og Svendborgvej (nr. 14) ligeledes blev oversvømmet på grund af vandudbredelse fra henholdsvis Hasseris Å og Romdrup Å.

8.5.1 Begrænsninger i datainput i forhold til modellering af vandstandsstigning og vandudbredelse

Som tidligere nævnt vil brodæk kunne betyde, at koten under brodækket ikke er korrekt, men derimod afspejler broens højde. Dette bliver problematisk i modelleringen af vandstandsstigning og vandudbredelse, da vandløbenes kote sættes efter højdemodellens kote i vandløbet. Hvis vandløbets kote svarer til brodækkets højde, så vil en lille vandstandsstigning kunne oversvømme store arealer ud for broen. I højdemodellen er brodækket de fleste steder fjernet, se eksempelvis Figur 53, og terrænets kote er efterfølgende bestemt ved interpolation af den laveste, nærliggende terrænkote. I Figur 49, side 73 var der derimod et eksempel på, at brodækket ikke var blevet fjernet, hvorved en vandudbredelse fra dette område ikke vil afspejle virkelige forhold.



Figur 53: Viser at brodækket er fjernet på vejen Over Kæret i det område, hvor Øster Å løber under.

Højdemodellens kote i vandløbene er målt ud fra vandstanden på det pågældende tidspunkt, hvor dataindsamlingen har fundet sted. I produktspecifikationen for Danmarks højdemodel fremgår det, at dataene er optaget fra 2005 til 2007 (KMS / Geografisk Infrastruktur, GIF@kms.dk, 2011). I modelleringen af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb mangler der dermed oplysninger om vandstandens højde i forhold til årstid og tidligere nedbørshændelser, og dermed om vandstanden er over eller under den normale kote.

8.5.2 Modellernes begrænsninger og styrker

Modelleringen af vandstandsstigning i vandløb og deraf udbredelse af vandet fra vandløbet mangler at inddrage en række parametre, som har betydning for, hvor udbredelsen finder sted, og hvor langt vandet udbredes. For det første vil udbredelsen afhænge af vandføringen i vandløbet, herunder vandstrømmens hastighed og mængden af vand i vandløbet. Vandmængden i vandløbet vil variere på forskellige steder af vandløbet. Dette skyldes, at der vil være forskellig tilstrømning af overfladisk afstrømning og underjordisk gennemstrømning til vandløbet på forskellige steder. Ligeledes udledes der vand til vandløbene fra kloaksystemerne, hvilket formodes at blive udledt i forskellige mængder flere forskellige steder i vandløbet. Dette bevirker dermed, at vandføringen forøges i takt med, at afstanden til udløbet i Limfjorden mindskes. Denne forøgelse i afstrømningen er ligeledes blevet påvist i modellering af Flow Accumulation, jævnfør Figur 17, side 34. Forskelle i vandmængden på forskellige dele af vandløbet vil bevirke, at både vandstandsstigningen og deraf vandudbredelsen vil variere, således at den største udbredelse vil forekomme ved den største afstrømning i vandløbet. For Aalborg vil de områder ved vandløbene, nærmest Limfjorden, derfor være i størst risiko for at blive oversvømmet. I analysen modelleres der samme vandstandsstigning overalt i alle vandløbene, hvorved modellerne ikke tager højde for den differentierende vandføring. Ved inddragelse af Flow Accumulation, ville det være muligt at tage højde for den overfladiske og underjordiske afstrømning i forhold til en potentiel udbredelse af vandløbet. Med manglende informationer om udledningen fra kloaksystemer, herunder mængderne og overløbsbygværk og stikledningernes placering i vandløbet, vil modellen dog ikke kunne fuldendes.

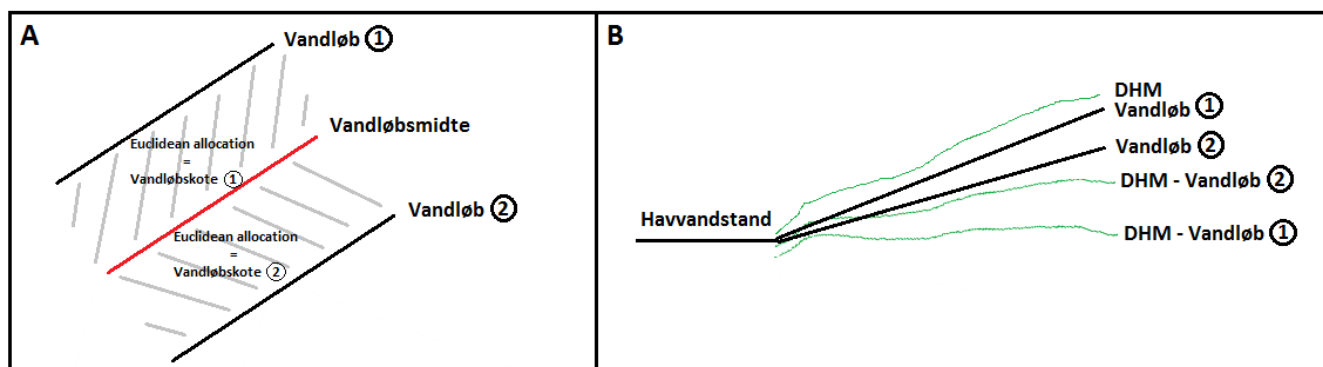
Foruden vandføringens indflydelse er forgreningsmønsteret og oplandsarealet af betydning for, hvilke områder der er i risiko for oversvømmelse fra vandløb. Forgreningsmønsteret kan siges at være tæt forbundet til beregningen af Flow Accumulation, da det ud fra Flow Accumulation kan aflæses, hvor vandløb strømmer sammen til et. Netop i disse områder vil der være forhøjet risiko for oversvømmelse, da vandmængden forøges betydeligt. Oplandsarealet bliver af betydning, da store oplande fører store vandmængder med sig. Igen afhængigt af forgreningsmønsteret vil de store oplande kunne opleve større risiko for oversvømmelser. Endelig har arealanvendelsen og jordtypen omkring vandløbet indflydelse på vandudbredelsens udstrækning. Jordens kapacitet og infiltration i vandløbs omkringsliggende arealer afgør netop, hvor langt og hvor hurtigt vandudbredelsen vil forløbe (Brivio, Colombo, Maggi, & Tomasoni, 2002).

I modellen bliver der ved anvendelse af værktøjet Euclidean Allocation dannet en allokeringsraster, som fratrækkes højdemodellen, hvorved der dannes en ny højdemodel, hvor terrænets kote er fastsat ud fra højden i vandløbet. Derved sker der en forvanskning af billedet, som vil give en upræcis repræsentation af højdeinformationen tilknyttet hver enkelt celle. Det kan blandt andet give sig udslag i en skarp opbremsning af vandudbredelsen, hvilket er illustreret ved den røde linje på Figur 54 (vandløbsmidten). Den røde linje på figuren angiver den lokalitet, hvor afstanden fra den røde linje til vandløb nummer 1 og vandløb nummer 2 er lige stor. Der må for de to vandløb gælde, at koten i vandløb nummer 1 er større end koten i vandløb nummer 2. Når der udføres euklidisk allokering bliver området mellem vandløb nummer 1 og vandløbsmidten fastsat til koten i vandløb nummer 1, mens området mellem vandløb nummer 2 og vandløbsmidten fastsættes til koten i vandløb nummer 2, dette er illustreret på Figur 55, A. Når allokeringsrasteren efterfølgende trækkes fra højdemodellen, kommer terrænet mellem vandløb nummer 2 og vandløbsmidten til at ligge højere end terrænet mellem vandløb nummer 1 og vandløbsmidten, dette er illustreret på Figur 55, B. Ved efterfølgende at modellere vandudbredelsen ved brug af værktøjet Cost Distance, vil vandet brede sig fra vandløb nummer 1 og frem til vandløbsmidten, hvorefter terrænets kote

bliver højere. Da der i højdemodellen ikke er tale om en sådan højdeforøgelse ved vandløbsmidten, gør beregningen af Euclidean Allocation derfor, at der skabes nogle ukorrekte koter i terrænet, som dermed får indflydelse på vandudbredelse.



Figur 54: Forvanskning af vandudbredelsen på grund af anvendelsen af værktøjet Euclidean Allocation. Kortet viser vandudbredelsen ved udmundningen af Romdrup Å.



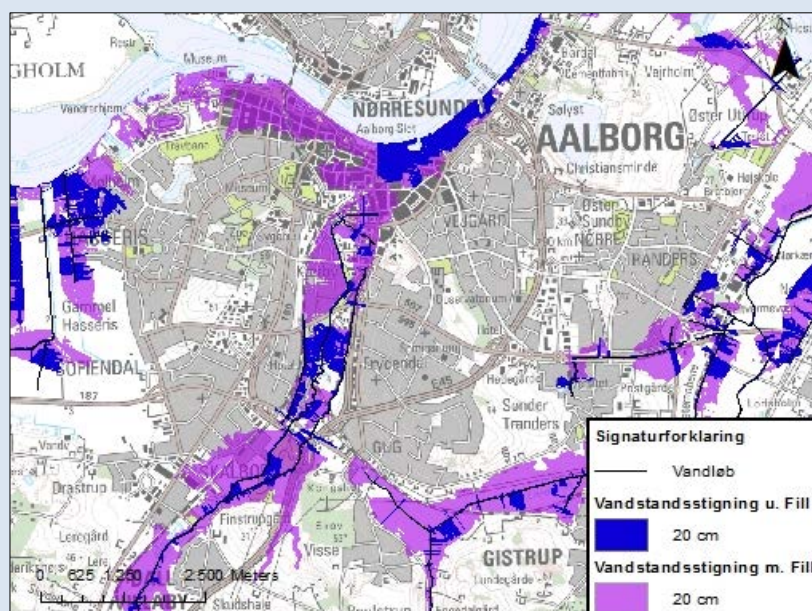
Figur 55: Illustration af A: kote-bestemmelse ved euklidisk allokering og B: terrænets kote ved beregning af DHM - vandløbs kote.

I modelleringen af vandudbredelsen anvendes alle vandløb i Kort10 i de udklippede oplande som *source*, det vil sige, at der modelleres lige stor vandstandsstigning og deraf udbredelse på alle vandløb uanset størrelse og vandføring. For området i Kærby vides det, at oversvømmelserne forårsages af kapacitetsmangel i Øster Å, og derfor vil der ikke være tale om en lige så stor vandstandsstigning og vandudbredelse fra eksempelvis Vestre Landgrøften som i Øster Å. Dette betyder, at vandudbredelse fra Vestre Landgrøften bliver overdimensioneret i modelleringen. Samme scenarie vil ligeledes gøre sig gældende for mindre vandløb i forbindelse med Hasseris Å og Romdrup Å.

BOKS 8.1: Vandudbredelse ud fra den fyldte højdemodel

Det blev i modelleringen af vandudbredelsen fra vandløb først forsøgt i modelleringen af euklidisk afstand at sætte vandløbets højde ud fra den *fyldte* højdemodel. Ved modelleringen heraf fremkom et resultat, hvor små vandstandsstigninger på blot 10 og 20 centimeter oversvømmede store, geografiske områder. Resultatet for en vandstandsstigning på 20 centimeter, hvor vandløbskoten var fastsat efter den fyldte højdemodel ses af Figur 56, hvor der sammenlignes med *projektets kortlægning* af vandstandsstigningen på 20 centimeter (her var vandløbene fastsat efter højden i den *ikke-fyldte* højdemodel). Det ses heraf, at store dele af Kærby blandt andet blev oversvømmet ved vandstandsstigninger på 20 centimeter ved den *fyldte* højdemodel.

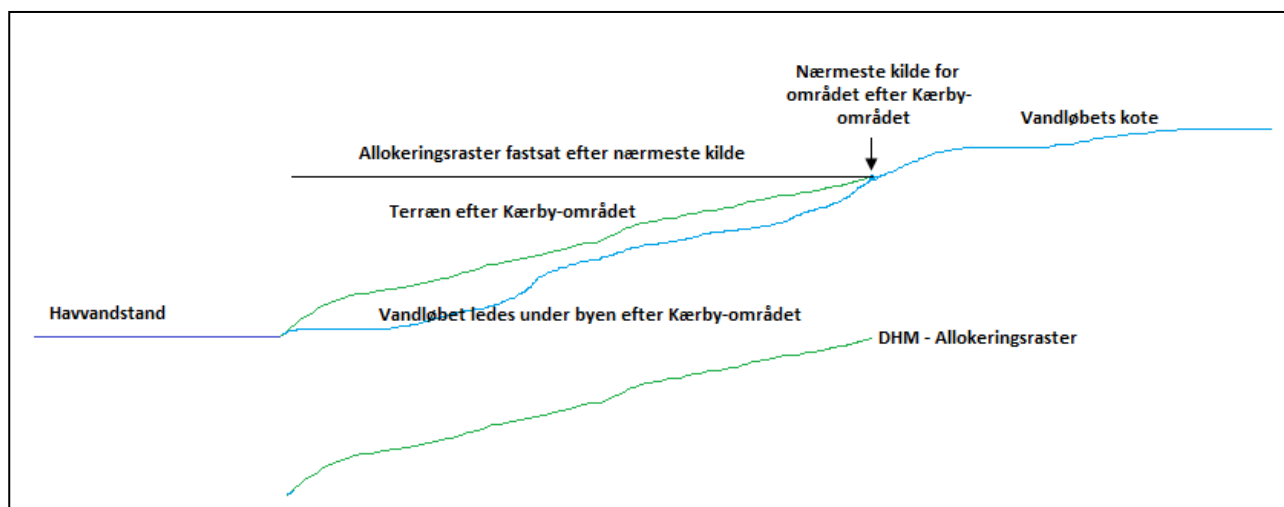
Ved at fylde lavninger forud for fastsættelse af vandløbets kote, blev de vandløb, som var beliggende i lavninger, tildelt en større kote end den aktuelle. Det fremgår blandt andet af Figur 31, side 56, som viser, hvor lavninger er beliggende i Aalborg, at store dele af Kærby er placeret i lavninger. Dette medførte, at der ved modelleringen af vandudbredelsen blev udpeget større områder som oversvømmelsestruet, end områderne var i virkeligheden.



Figur 56: Sammenligning med resultat af vandstandsstigning på 20 centimeter med og uden brug af værktøjet Fill forud for fastsættelse af vandløbet kote.

I beregningen af Euclidean Allocation er det problematisk, at vandløbs-temaet ikke indeholder den underjordiske rørledning af Øster Å, men derimod stopper efter Kærby-området, jævnfør Figur 39, side 62. Dette bevirker, at området fra vandløbet og ned mod havnen ved euklidisk allokering får tilknyttet en kote for den del af vandløbet, der stopper efter Kærby-området, da dette er nærmeste kilde. Ved efterfølgende at trække den fundne euklidisk allokerede raster fra den oprindelige højdemodel, vil den fremkomne kote i området fra vandløbet og ned mod Limfjorden være meget lav grundet koten nær Limfjorden, scenariet er illustreret på Figur 57. Det er ikke sandsynligt, at vandet i vandløb vil brede sig så langt væk, hvormed det vurderes, at den euklidiske allokering giver fejl i kortlægningen. For at problemet skulle undgås, ville det

være nødvendigt at medtage den del af vandløbet, som strømmer under jorden eller anvende Flow Accumulation som kilde-raster i stedet.



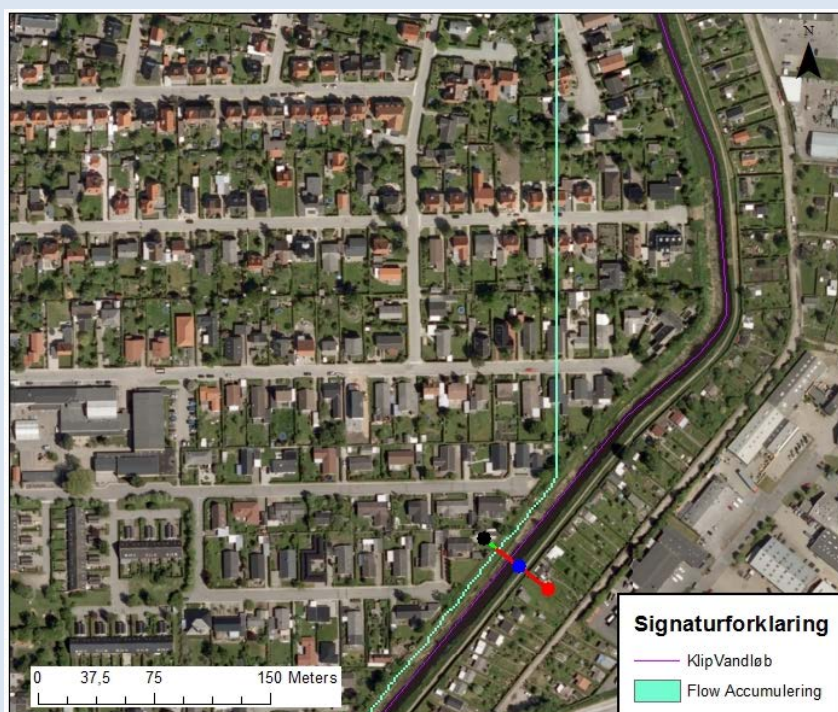
Figur 57: Illustrerer den fremkomne kote for byområdet efter Øster Å ledes under byen fundet ved at trække allokeringrasteren fra højdemodellen.

Styrken ved modellering af vandudbredelse ved vandstandsstigninger er, at det er muligt at modellere digernes betydning på oversvømmelsesrisikoen, hvilket ingen af forudgående modeller er i stand til. Videre afspejler modellen den virkelighed, der er for boligejere omkring Øster Å, hvor de gentagne gange oplever oversvømmelser grundet kapacitetsmangel i åen. Modellen, som den er fremstillet i denne kandidatafhandling, kan desuden ud fra samme datainput, overføres til andre bydele, som oplever oversvømmelser ved vandudbredelse fra vandløb.

BOKS 8.2: Overvejelse af anvendelse af Flow Accumulation som kilde

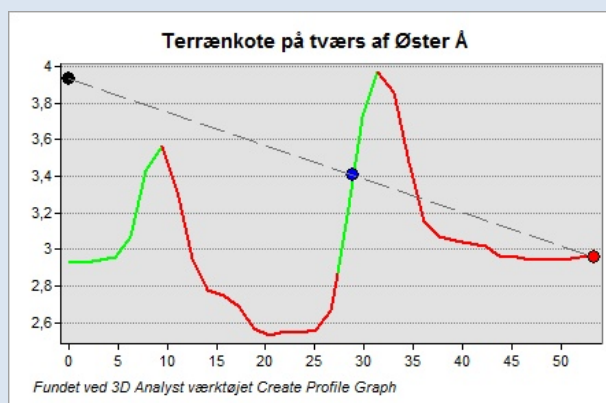
I modelleringen af vandudbredelse ved vandstandsstigninger i vandløb er det blevet overvejet at anvende Flow Accumulation i stedet for vandløbs-temaet fra Kort10 i beregningen af den euklidiske allokering og som kilde i den efterfølgende beregning af Cost Distance. Overvejsen er gjort for at kunne undgå oversvømmelsen af havneområdet, da Flow Accumulation, modsat vandløbs-temaet fra Kort10, modellerer Øster Å's vandføring helt ud til Limfjorden. Samtidig vil modellen ved anvendelse af Flow Accumulation kunne udbygges, ved efterfølgende at simulere vandudbredelsen i forhold til vandmængderne i vandløbet.

I beregningen af Flow Accumulation er det nødvendigt først at fylde huller og lavninger i højdemodellen. Dette bevirker, som tidligere beskrevet, at Flow Accumulation ikke fastsættes i samme områder som vandløbs-temaet, se eksempel på Figur 58. Dette skyldes blandt andet, at brodækket ikke er fjernet for alle broer, hvorved terrænets kote fastsættes efter broens højde frem for terrænet nedenunder. Endvidere vil Flow Accumulation i flade områder ikke kunne bestemmes præcist, men vil derimod finde den korteste vej over området.



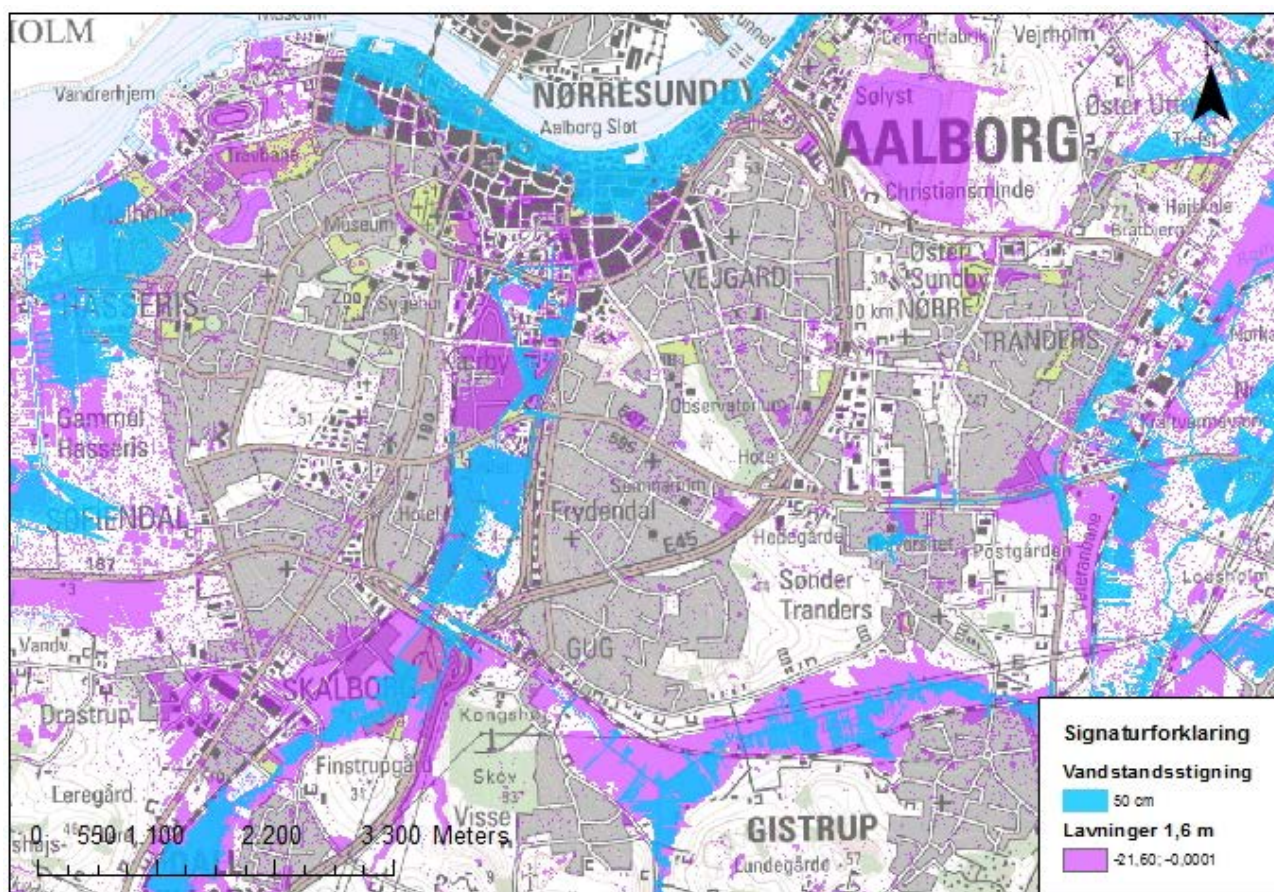
Figur 58: Viser forskellen mellem modelleret Flow Accumulation og vandløbs-temaet fra Kort10. Der er ved hjælp af værktøjet Create Line of Sight målt koten på tværs af vandløbet. Koten ses af grafen. Ortofoto fra 2010: Ophavsrettigheder: COWI.

Da det i modellering af vandstandsstigning og vandudbredelse er vigtig, at vandet udbredes fra vandløbenes aktuelle strømning for at kunne modellere digernes betydning og kortlægge de oversvømmelsestruede områder, blev det vurderet, at en anvendelse af Flow Accumulation i stedet for vandløbs-temaet fra Kort10 ikke ville give et mere virkelighedstro resultat.



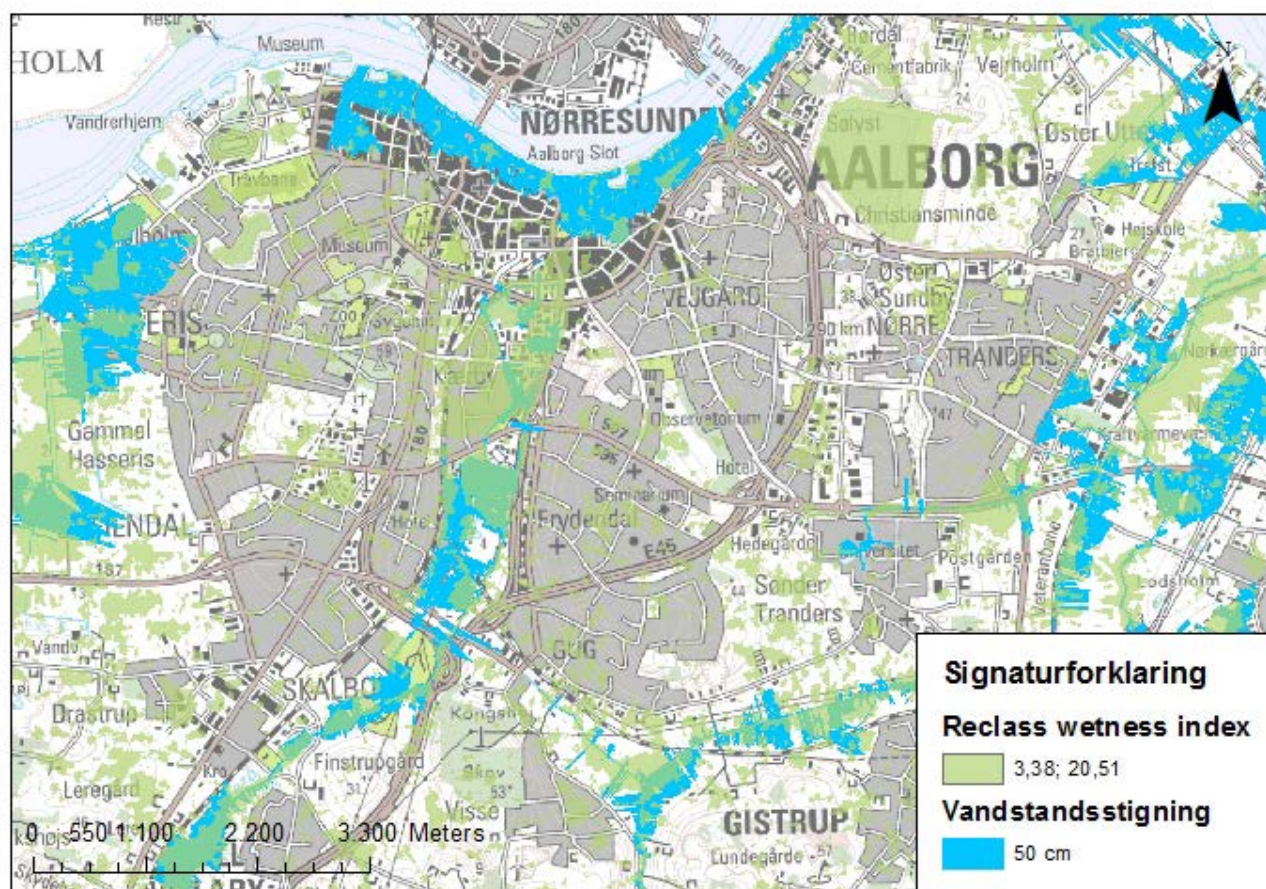
8.5.3 Diskussion af resultatet

På Figur 59 er *projektets kortlægning* af vandudbredelse ved vandstandsstigning på 50 centimeter i vandløb sammenlignet med *projektets kortlægning* af lavninger. Det fremgår af figuren, at der er god overensstemmelse mellem lavninger og vandudbredelsesfunktionen. Det ses, at vandløbene strømmer gennem flere lavninger, hvilket påviser, at vandløbene følger topografien og dermed snor sig gennem det laveste terræn i landskabet. Ved vandstandsstigningen på 50 centimeter ses digernes beskyttende effekt på Kærby, der, på trods af at være placeret i en lavning, er beskyttet for oversvømmelse fra vandløbet.



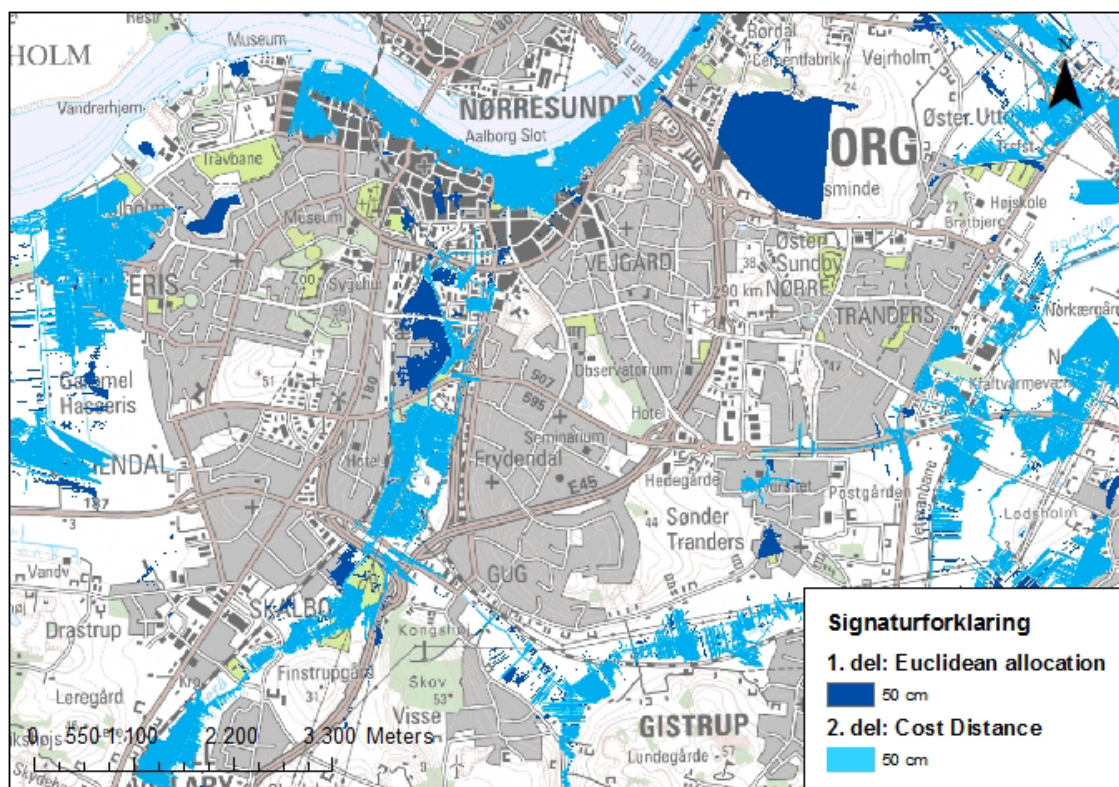
Figur 59: Sammenligning af Lavninger og vandudbredelse ved vandstandsstigning på 50 cm.

Endvidere er vandudbredelsesfunktionen blevet sammenlignet med wetness index, se Figur 60. Af Figur 60 ses det, at der er sammenfald mellem de to modellers udpegning af oversvømmelsestruede områder, da wetness index primært er placeret i områder, som vil oversvømmes ved udbredelse fra vandløb. Begge modeller er fremstillet ud fra vandløbsmønstre, hvorfor sammenfaldet var forventet. Det skal dog påpeges, at vandløbsmønstrene er inddraget på to forskellige måder, hvor det i wetness index var en modellering af Flow Accumulation, blev vandudbredelsen fundet med udgangspunkt i et vandløbs-tema fra kort10. Dette kan endvidere være med til at forklare de uoverensstemmelser, hvor wetness index ikke overlapper vandudbredelsen, som det eksempelvis ses ved Romdrup Å. Fremstillingen af modellerne minder desuden om hinanden, da begge modeller lokaliserer oversvømmelsestruede områder ud fra to parametre; vandløbsmønstre og topografi. Foruden forskellen i inddragelsen af vandløbsmønstre beregnes wetness index ud fra hældningen, mens vandudbredelsen bestemmes ud fra koten i vandløbenes omkringliggende terræn i forhold til koten i vandløbet (Euclidean Allocation).



Figur 60: Sammenligning af modelleringen af de største værdier for wetness index (uden implementering af forseglingsprocent) og modelleringen af vandudbredelse ved vandstandsstigning på 50 cm i vandløb.

Afslutningsvist sammenlignes resultatet af første del (lokalt differentieret højdeallokeringsmodellen) og anden del (udbredelsesfunktion ved implementering af værktøjet Cost Distance) af modelleringen af vandudbredelsen. Dette er kortlagt på Figur 61. For første del af analysen er de dele af terrænet, som har kote lavere end 50 centimeter uddraget. Det fremgår af Figur 61, at der ikke er stor forskel på de to resultater. Inden for Aalborgs bydele er der kun forskel på udpegningen af oversvømmelsestruede områder i Hasseris, Kærby, midtbyen, Skalborg, Sønder Trønders og ved kridtgraven i Aalborg Øst. Ved brug af værktøjet Cost Distance præciseres modellen, da vandet ved vandudbredelse fra vandløb vil brede sig efter topografien i landskabet. I forhold til en vandstandsstigning på 50 centimeter vil vandet derfor ikke kunne nå de mørkeblå områder på Figur 61 ved udbredelsen. Det kan dog ikke afvises, at de mørkeblå områder på Figur 61 er i risiko for at blive oversvømmet, da områderne er lavere placeret i forhold til det omkringliggende terræn, og områderne derfor kan fungere som lavninger.



Figur 61: Sammenligning af 1. del og 2. del af analysen, hvor der modelleres vandstandsstigning på 50 cm.

I *projektets kortlægning* af vandudbredelsen lokaliseres hovedsagelig de samme allerede udsatte områder, som der blev lokaliseret i modelleringen af lavninger og wetness index. Udbredelsesfunktionen kortlægger dog ikke Vardevej (nr. 12), men til gengæld indgår Svendborgvej (14). Modsat modelleringen af wetness index inddrager *projektets kortlægning* af vandudbredelsen Engen og Ådalen (nr. 5) i de oversvømmelsestruede områder.

8.5.4 Modellens anvendelsespotentiale

Forud for en anvendelse af modellen i byplanlægningen er det nødvendigt at sikre sig, at alle brodæk er fjernet i højdemodellen, hvorved koten afspejler terrænets kote og ikke broens højde.

På grund af manglende viden om dataoptagelsen i forhold til vandstandens kote, giver de anvendte vandstandsstigninger ikke nødvendigvis et virkelighedsnært billede af, hvilke områder der oversvømmes. Det vil være nødvendigt at have en viden om vandløbets normale kote eller den aktuelle kote, for derved at bestemme realistiske vandstandsstigninger. Når der ikke er kendskab til, hvornår data er optaget i forhold til vandstanden i vandløbene, kan det ikke afgøres, om vandstandsstigningerne på 20, 50 eller 100 centimeter udgør en reel risiko. Ved hvilken vandstandsstigning digerne langs Øster Å overskrides, er dermed ikke til at fastlægge af modelleringen. Frem for en egentlig udpegelse af oversvømmelsestruede områder i *projektets kortlægning* af vandudbredelse ved vandstandsstigning i vandløb beskriver modelleringen nærmere en udvikling, og modellen fastsætter dermed ikke den reelle risiko. Det vil være nødvendigt at supplere modellen med nivellering af vandløb, for at kunne kortlægge den reelle risiko.

Det er problematisk, at modellen ikke tager højde for forskellig vandføring i de forskellige vandløb, da dette vil medføre forskellig udbredelse. For at sikre sig dette, vil det være nødvendigt at anvende Flow

Accumulation som kilde i stedet for vandløbs-temaet fra Kort10. Derved kan vandføringen inddrages i beregningen af Euclidean Allocation, hvorved der kan simuleres forskellige vandudbredelser ud fra vandløbenes forskellige størrelse og vandføring. I brugen af Flow Accumulation er der dog yderligere en række fejl forbundet, hvilket blandt andet medfører, at placeringen af vandløb ikke er korrekt i forhold til de aktuelle vandløb. Det vil derfor kræve yderligere foranstaltninger, hvorved det er nødvendigt at fastsætte vandløbets placering efter vandløbs-temaet fra Kort10 (nærmere beskrivelse heraf i kapitel 10. VIDEREUDVIKLING AF MODELLERNE).

I modellering af vandudbredelsen er det nødvendigt at se bort fra oversvømmelserne langs havne-området, da vandløbs-temaet ikke indeholder det rørlagte vandløb fra Kærby og ud i Limfjorden, hvorved modellering af Euclidean Allocation giver et forkert billede af koten her. Brugen af værktøjet Euclidean Allocation giver desuden nogle fejl, eksempelvis ved skarpe opbremsninger af den modellerede vandudbredelse.

Det vurderes, at *projektets kortlægning* af vandudbredelsen er en forbedring i forhold til *projektets kortlægning* af lavninger, da der ved modellering af vandudbredelse præciseres, hvilke områder vandet kan udbredes til. På trods af at modellering af vandudbredelsen ved vandstandsstigning i vandløb kortlægger flere af de *allerede udsatte områder* i et oversvømmelsestruet område end *projektets kortlægning* af wetness index, vurderes metoden ikke mere anvendelig. At wetness index ikke kortlægger flere af de *allerede udsatte områder* til at være beliggende i områder med høj wetness index kan formodentligt forklares i, at modelleringen af wetness index anvendte den generaliserede højdemodel med 10 meter grid som datainput frem for den mere detaljerede 1,6 meter højdemodel.

Det kan på baggrund af ovenstående slutes, at *projektets kortlægning* af vandstandsstigning og vandudbredelse fra vandløb kortlægger potentialet frem for den reelle risiko. Det vil derfor være nødvendigt at forbedre modellen yderligere, forud for en direkte anvendelse i en eventuel byplanlægning.

8.6 Samling af modellerne

De tre modeller adskiller sig betydeligt fra hinanden i forhold til fremgangsmåden og hensigten med modelleringen. Modellerne kortlægger derfor forskellige typer af risikoområder ved forøgede nedbørsmængder. Dette gør, at modellerne fungerer som et godt supplement til hinanden. I en samling af modellerne kortlægges således lavninger i terrænet, våde og flade områder, samt lave områder i forbindelse med vandløb.

8.6.1 Modellernes begrænsninger og styrker

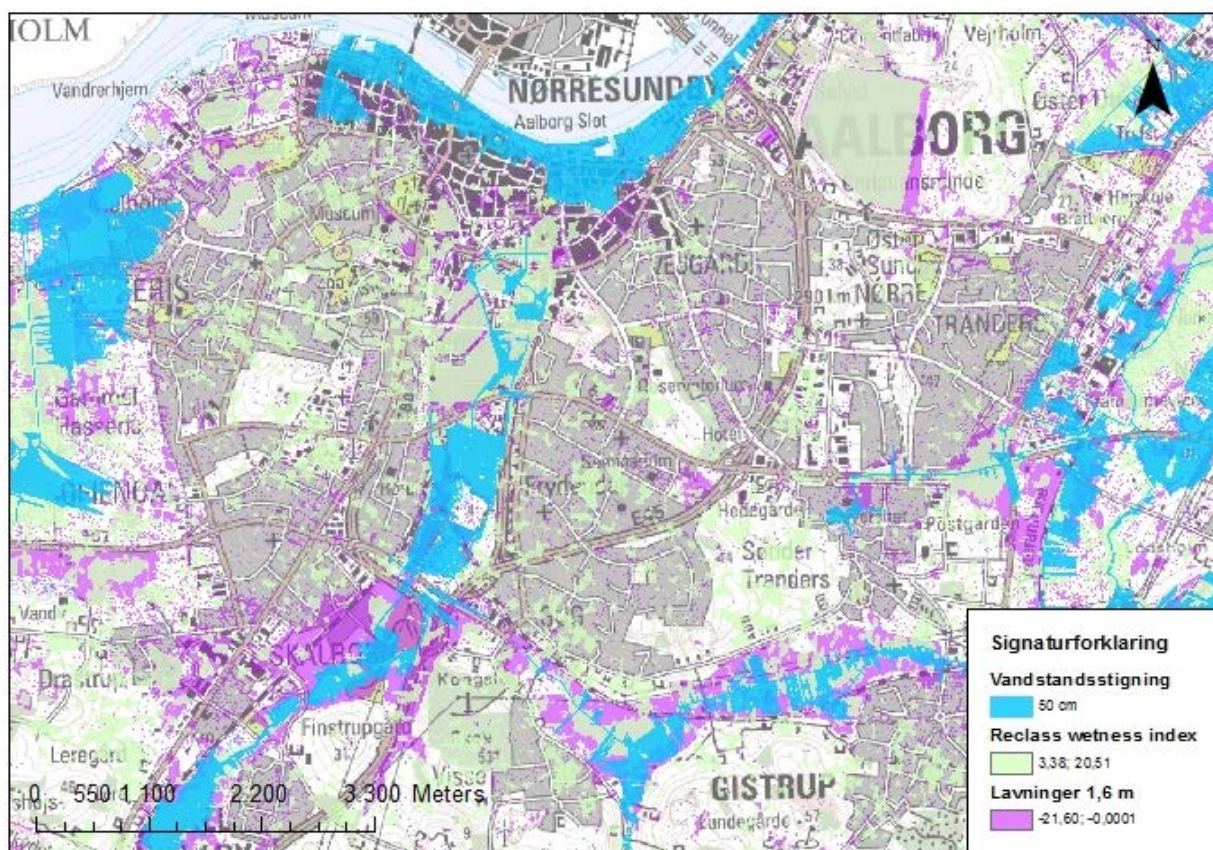
Med de udførte metoder til rumlig analyse har Danmarks højdemodel været det eneste datainput. Derfor er de valgte modeller udviklet med udgangspunkt i højdemodellerne, hvorfor topografien betragtes som af afgørende betydning for risikoen for oversvømmelser. Foruden inddragelsen af et vandløbs-tema fra Kort10, er alle analyser derfor udført alene ud fra højdemodellerne, hvorved det var muligt at bestemme oplande, strømningsretningen, mønstre i overfladeafstrømningen, hældning og lavninger i terrænet. Fra forudgående indsamlet viden om, hvorfor oversvømmelser opstår, er jeg dog opmærksom på, at der er andre parametre, som spiller ind på risikoen for oversvømmelse i et område. Først og fremmest forårsages oversvømmelserne, behandlet i denne kandidatafhandling, af nedbørshændelser. Med hvilken hastighed, over hvilket tidsrum og i hvilken geografisk udstrækning nedbøren falder, vil derfor have afgørende betydning for, hvorvidt oversvømmelser opstår (Smith & Ward, 1998). Jordtypen i forhold til kapacitet og

infiltrering har endvidere betydning for risikoen for oversvømmelser. I projektet er kloaksystemers betydning ligeledes blevet undersøgt, og da det valgte analysefelt er Aalborg by, bliver kloakforholdene derfor af afgørende betydning for oversvømmelsesrisikoen. At disse parametre ikke er inddraget i modellerne til rumlig analyse kan derfor betragtes som en mangel i analysen og kortlægningen af oversvømmelsestruede områder. Det vil netop være nødvendigt, at have kendskab til hvor meget vand, der strømmer til et område såvel som, hvor meget der ledes væk fra området enten gennem jorden eller kloaksystemet, for at kunne vurdere den reelle risiko i det pågældende område.

Styrken ved modellerne er, at, med undtagelse af et vandløbs-tema fra Kort10, det kun er en højdemodel, som skal benyttes som datainput. Vandløbs-temaet kan desuden erstattes af beregningen af Flow Accumulation ud fra højdemodellen. Dermed kræver modellerne få ressourcer at fremstille.

8.6.2 Modellernes resultater

Af Figur 62 ses projektets modelleringer af oversvømmelsestruede områder samlet i et kort. Det ses heraf, at mange af *projektets kortlagte oversvømmelsestruede områder* er fælles for alle tre modelleringer.



Figur 62: Projektets kortlægning af oversvømmelsestruede områder bestemt ved modellering af lavninger, wetness index og vandstandsstigning og deraf vandudbredelse.

Det eneste område af de *allerede udsatte områder*, som ikke blev kortlagt som oversvømmelsestruet eller opgrænsende til et oversvømmelsestruet område i *projektets kortlægning* var Vejgaard området. Oversvømmelserne i Vejgaard var af kældre og skyldes, ifølge Schouenborg, 2005 og Kongsgaard, 2009, kloaksystemerne. På baggrund af forudindsamlet viden samt artikel researchen kan det udledes, at området tidligere har været fælleskloakeret, hvorved oversvømmelserne var forårsaget af, at stikledninger

og hovedledninger ikke kunne rumme de kraftige nedbørsmængder. På baggrund af denne viden kunne det ikke forventes, at *projektets kortlægning* kunne kortlægge området som oversvømmelsestruet, da modellerne anvender topografi og vandløb som eneste datainput.

8.6.3 Modellernes samlede anvendelsespotentiale

Med Danmarks højdemodel som datainput for modelleringen påpeges en række alvorlige problemer, som får indflydelse på kortlægningen af oversvømmelsestruede områder. Her indgår den datafejl, at ikke alle brodæk er fjernet i højdemodellen, hvorfor terrænets kote er angivet til brodækkets højde. En anden fejl består i, at der ikke er kendskab til den aktuelle kote i vandløbene i forhold den målte kote i vandløbene i højdemodellen. Dette bevirker, at kortlægningen vil være behæftet med fejl, og den manglende viden om den aktuelle vandstand i vandløbene gør, at der ikke kan fastsættes realistiske bud på en eventuel vandstandsstigning. Det er vigtigt i denne sammenhæng at bemærke, at højdemodellen anvendes på en måde, som ligger ud over produktspecifikation for Danmarks højdemodels (KMS / Geografisk Infrastruktur, GIF@kms.dk , 2011). Derfor skal højdemodellen videreudbygges og det vil være nødvendig at indsamle de nødvendige oplysninger om vandløbenes aktuelle vandstand.

Eftersom samlingen af modellerne ikke udpeger alle de *allerede udsatte områder*, kan det slutes, at en modellering ud fra topografi og vandløb ikke alene kan kortlægge alle oversvømmelsestruede områder i et byområde som Aalborg. For Aalborg var den manglende parameter kloaksystemet, da manglende kapacitet heri medførte oversvømmede kældre i Vejgaard området.

For alle tre modeller blev der kortlagt oversvømmelsestruede områder, som, der på baggrund af interview med medarbejder fra Aalborg kommune samt artikel research ikke haves kendskab til, har været oversvømmet tidligere. Det kan derfor ikke afvises, at modellerne udpeger flere områder end der egentlig er oversvømmelsestruet. For at afgøre om områderne er udsatte, vil det være nødvendigt med yderligere undersøgelse af *projektets kortlagte* områder, for at kunne vurdere om der er en reel risiko. I den forbindelse bør kloakforhold, jordtype og en eventuel etablering af dræn, pumpestationer, sluser, kanaler eller stemmeværker undersøges.

Med en manglende viden om, for hvilke værdier af wetness index et område kan karakteriseres som oversvømmelsestruet samt en manglende viden om mulige vandstandsstigninger i forhold til den aktuelle vandstand i vandløbene, er det ikke muligt at bestemme oversvømmelsernes geografiske omfang. Dertil kræves yderligere undersøgelser. På trods af denne manglende viden, samt rækken af manglende parametre i kortlægningen, præsenteret tidligere, vurderes modellerne anvendelige til at vurdere risikoen i et område i forhold til omkringliggende områder. Det er dermed et områdes potentiale for oversvømmelse, der kortlægges i projektets modelleringer.

Det skal afslutningsvist slås fast, at projektets udarbejdede kort er en kortlægning af modeller, og de dermed kun udgør en repræsentation af virkeligheden. Det vil ikke være muligt at modellere naturen fuldstændigt, da menneskelige og naturlige processer altid spiller ind på forskellige måder forskellige steder. Det kan derfor ikke forventes, at en kortlægning af oversvømmelsesmodeller i ArcGIS ikke vil være behæftet med fejl og usikkerheder. Der er gennem projektet lagt op til en række forbedringer, som kan medvirke til at minimere fejlene og usikkerheden, hvorved modellernes repræsentation af virkeligheden muligvis kan forbedres. Det er derfor nødvendig at arbejde videre på området og udvikle højdemodellen samt projektets modelleringer yderligere.

9. KONKLUSION

Det er i projektet blevet belyst, at oversvømmelser i Aalborg opstår ved, at længerevarende og kraftigere nedbørshændelser i bymiljøet skaber en forhøjet overfladisk afstrømning samt en hurtig afledning af regnvand via kloaksystemet. Regnmængderne løber på overfladen mod terrænets laveste punkter, hvorved vandet kan blive ophobet i lavninger eller transporteres langs Aalborgs vandløb mod Limfjorden. Topografien bliver derved drivende kraft for vandets strømning, hvorfor oversvømmelserne opstår ved topologiske lavpunkter, langs vandets strømningsveje, hvor terrænet er fladt og endelig i forbindelse med vandløb, som modtager stor afstrømning fra oplandet.

På baggrund af de kortlagte årsager til oversvømmelser i Aalborg vælges det at modellere tre forskellige analyser i ArcGIS til lokalisering af oversvømmelsestruede områder.

Da afstrømning konvergerer i topologiske lavpunkter, kan ArcGIS anvendes til at kortlægge lavninger i terrænet. Med Danmarks højdemodel som datainput kan kortlægningen udføres hurtigt ved brug af værktøjet Fill. Derved fyldes alle lavninger i terrænet, og ved efterfølgende at trække den fyldte højdemodel fra den oprindelige højdemodel kortlægges lavningerne i meters dybde.

Med en indsigt i, at oversvømmelser opstår på fladt terræn, hvor overfladisk afstrømning samles, kan ArcGIS anvendes til at lokalisere oversvømmelsestruede områder ved beregning af wetness index. Wetness index er et matematisk udtryk, som beregnes af formlen: $\ln(\alpha/\tan\beta)$, hvor α betegner mængden af vand, der strømmer til hver en celle (100 m^2 for højdemodellen med 10 meter grid) fra arealer opstrøms inden for cellens opland, mens β betegner cellens hældning i forhold til dens naboceller. Beregningen af wetness index giver et udtryk for jordens fugtighed og deraf, hvor højt grundvandsspejlet er placeret i forhold til jordens overflade. Dermed betyder store værdier for wetness index stor jordfugtighed og dermed stor risiko for oversvømmelse. Ved at inkorporere et arealanvendelseskort kan beregningen af wetness index præciseres ved at tage højde for forskellige arealtypers forseglingsprocent.

Ved kapacitetsmangel i Aalborgs vandløb kan ArcGIS anvendes til at kortlægge de områder, der ved vandstandsstigning i vandløbene, potentielt kan rammes af oversvømmelser. I modelleringen heraf er det nødvendigt først at udarbejde en euklidisk allokering, hvorved terrænets kote fastsættes efter koten i det nærmeste vandløb. Ved efterfølgende at trække denne fremkomne allokeringsraster fra den oprindelige højdemodel fås en højdemodel, hvor terrænet ikke hælder mod Limfjorden. Med en anvendelse af denne udarbejdede højdemodel kan de områder, som ligger under en absolut vandstandsstigning på 20, 50 og 100 centimeter, lokaliseres ved anvendelse af funktionen CON. Afslutningsvist benyttes værktøjet Cost Distance, hvorved vandudbredelse fra Aalborgs vandløb simuleres ud fra de pågældende vandstandsstigninger. I brugen af dette værktøj systematiseres vandudbredelsen, således at vandstrømmen kun udbredes fra vandløbet og kan bremses af topografi i form af eksempelvis diger.

For at vurdere modellernes anvendelsespotentialer er modellernes begrænsninger og resultater diskuteret.

De udarbejdede modellens anvendelsespotentialer er begrænset af, at højdemodellen som datainput leverer forkerte højdeinformationer i forbindelse med brodæk. Ved nogle brodæk er højdeinformationen i

Danmarks højdemodel angivet til koten ved brodækket frem for det underliggende terræn. Dette medfører, at der, for de områder hvor brodækket ikke er fjernet, fås afvigende afstrømningsmønstre og overdimensioneret vandudbredelse. Ved en anvendelse af projektets modeller, bør højdemodellen derfor præciseres ved at fjerne samtlige brodæk.

I modelleringen af lavninger i ArcGIS fremkommer et resultat, som lokaliserer store geografiske områder i Aalborg, og hvor flere af de områder, som tidligere har været oversvømmet, indgår. Kortlægningen lokaliserer potentielle oversvømmelsestruede områder, men en videre undersøgelse af de udpegede lavninger er nødvendig for en vurdering af den reelle risiko, da risikoen for oversvømmelse ikke afgøres af topografien alene. Derfor bør kloakforhold, afstrømningsmønstre og eventuelle etablering af dræn eller pumpestationer i lavningen undersøges forud for en direkte udpegning af oversvømmelsestruede lavninger.

Projektets modellering af wetness index blev udført med en generaliseret højdemodel med 10 meter grid. Anvendelsen af denne højdemodel har vist sig ikke at være detaljeret nok, og det formodes derfor, at en mere præcis modellering af wetness index vil kunne opnås ved anvendelse af højdemodellen med 1,6 meter grid. Beregningen af wetness index bygger på strømningsmønstre og hvor meget vand, de enkelte celler modtager fra arealer opstrøms. Dette fastlægges i beregningen af Flow Accumulation i ArcGIS. Beregningen heraf bibringer dog ikke resultater, som er samstemmende med placeringen af Aalborgs vandløb. Dette skyldes, at brodæk ikke konsekvent er fjernet, samt at beregningen af Flow Accumulation i fladt terræn vælger den korteste vej over terrænet. Ved en anvendelse bør modellen derfor udbygges, så det sikres, at Flow Accumulation overlapper vandløbene. For modelleringen af wetness index med forseglingsprocenten inkorporeret fås et resultat, hvor værdierne for wetness index er større i byområdet, samtidig med at de områder med høj værdi for wetness index er geografisk større. Derved afspejler beregningen af wetness index med forsegling inkorporeret forseglings effekt i byområdet, og betragtes derfor som en forbedring af modellen af wetness index uden forsegling inkorporeret. Resultatet af kortlægningen af wetness index (med og uden forsegling inkorporeret) er begrænset af, at modellen ikke leverer information om, for hvilke værdier af wetness index, der er tale om en reel risiko for oversvømmelse. Forud for en anvendelse af modelleringen af wetness index vil det derfor være nødvendigt, at der bliver indsamlet en viden på dette område, som derved kan videreføres til praksis. Modellen er på nuværende tidspunkt ikke anvendelig til en direkte udpegning af oversvømmelsestruede områder men angiver derimod, hvor stor risikoen for oversvømmelse er i et område i forhold til andre områder.

Modelleringen af vandstandsstigninger er begrænset af, at de simulerede vandstandsstigninger på 20, 50 og 100 centimeter er betinget af den pågældende vandstand under dataoptagelsen for højdemodellen. Derfor vil en modellering af en vandstandsstigning på eksempelvis 20 centimeter ikke nødvendigvis afspejle, hvilke områder der bliver oversvømmet, hvis vandstanden stiger 20 centimeter nu (foråret 2012). Det er derfor nødvendigt at sammenligne vandløbenes kote i højdemodellen med den aktuelle kote i vandløbene for at kunne modellere, hvilke områder der oversvømmes ud fra specificerede vandstandsstigninger. Ved at anvende en højdemodel som er dannet ved at trække en allokeringsraster fra Danmarks højdemodel opstår der fejl i forbindelse med havneområdet og ved vandløbsmidter. Andre fejl i modellen opstår, da der modelleres samme vandstandsstigning overalt i vandløbene, hvormed modellen ikke tager højde for divergerende vandføring i forskellige vandløb. På trods af modellens mangler og fejl,

giver kortlægningen et resultat, som illustrerer udviklingen ved forskellige vandstandsstigninger og giver et billede af, hvilke områder der potentielt kan oversvømmes. Fejlene gør dog, at modellen ikke på nuværende tidspunkt kan anvendes til at vurdere risikoen og dermed lokalisere de oversvømmelsestruede områder. Det vil derfor være nødvendigt at forbedre modellen yderligere.

Det kan konkluderes, at modellerne fungerer som et godt supplement til hinanden, da de kortlægger forskellige områder, der vil være truet af oversvømmelse ved kraftige eller længerevarende nedbørshændelser. Både hver for sig samt samlet lokaliserer de ikke alle de områder, der tidligere har været udsat for oversvømmelse, som oversvømmelsestruede. Modellerne kan derfor ikke anvendes alene til udpegning af oversvømmelsestruede områder, hvorfor de nødvendigvis skal suppleres med andre modeller.

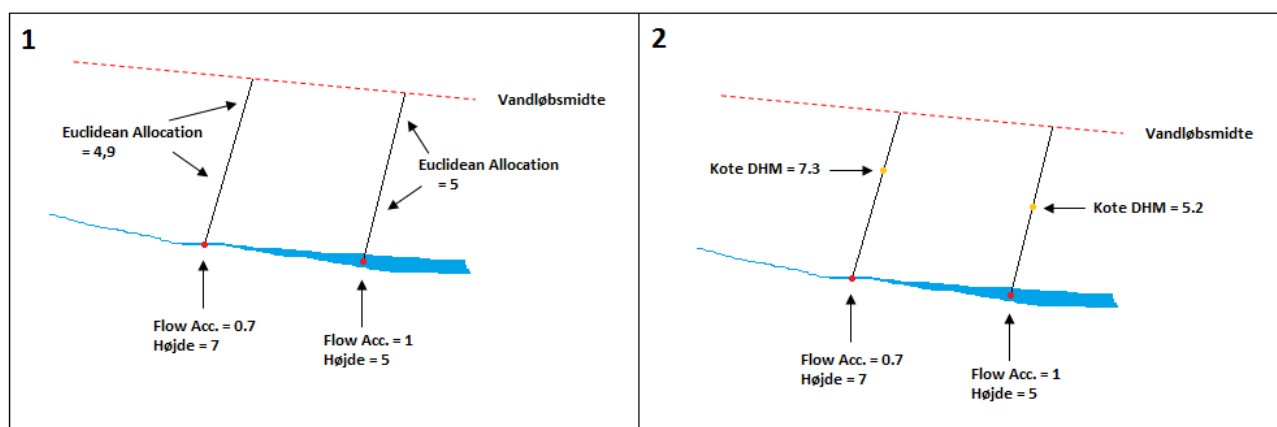
Afslutningsvist kan det konkluderes, at de tre modeller på nuværende tidspunkt ikke er anvendelige til en direkte udpegning af oversvømmelsestruede områder. Det vil derfor være nødvendigt at arbejde videre på modellerne, således at de fundne fejl kan udviskes. Først derefter vil det være muligt at vurdere, om modellerne beskriver virkeligheden godt nok til at blive taget i brug til en direkte udpegning af oversvømmelsestruede områder.

10. VIDEREUDVIKLING AF MODELLERNE

Det er i projektet blevet konkluderet, at de udarbejdede modeller skal forbedres i forhold til de fundne fejl og begrænsninger forud for en anvendelse af modellerne. Derfor ønskes det i denne perspektivering behandle, hvordan modellerne kan forbedres for dermed at blive anvendelige til udpegning af oversvømmelsestruede områder.

Det er blevet afklaret, at Flow Accumulation i modelleringen af wetness index ikke afbilder den aktuelle afstrømning, da det i forud for modelleringen af Flow Accumulation er nødvendigt at fylde lavningerne i højdemodellen. Vandløb er ofte lokaliseret i topologiske lavninger, hvilket ligeledes fremgik af projektets kortlægninger. Ved anvendelse af værktøjet Fill, bliver vandløbenes kanaler derfor udjævnet. Terrænet bliver derved fladt, hvorved modelleringen af Flow Accumulation løber den korteste vej over terrænet. Det er muligt at manipulere modelleringen af Flow Accumulation, således at afstrømningen følger vandløbenes aktuelle placering. Dette kan gøres ved at "brænde" vandløbenes placering ned i højdemodellen, hvorved modelleringen af Flow Accumulation vil strømme denne vej. Modelleringen skal udføres i ArcGIS 10.0 ved installation af Arc Hydro Tools (Berolo, 2007/2008). Ved brug af funktionen *DEM Reconditioning* er det derved muligt at sænke koten i højdemodellen ud fra et linje-tema ved at specificere en buffer afstand for linjen og sænkningens dybde (Berolo, 2007/2008) (Hellweger, 1997). I projektets kontekst skal en anvendelse af vandløbs-temaet fra Kort10 som linje-tema for sænkningen benyttes. Ved at modellere en nedsænkning i den fyldte højdemodel ud fra vandløbs-temaet fra Kort10, vil en efterfølgende modellering af Flow Accumulation afspejle afstrømningsmønstrene mere virkelighedstro. Det formodes derfor, at en modellering af wetness index med denne inddragelse i højere grad vil repræsentere virkeligheden og dermed bedre kunne lokalisere oversvømmelsestruede områder.

I projektets tredje model kan modellering af vandudbredelse videreudvikles ved at anvende Flow Accumulation som kilde for den euklidiske allokering samt i beregningen af Cost Distance. Fordelen ved en anvendelse af Flow Accumulation er, at det er muligt at tage højde for differentieret vandføring i forskellige vandløb samt på forskellige dele af vandløbene. Dermed kan vandudbredelsen modelleres således, at den afhænger af, hvor meget vand der strømmer til vandløbet. Forud for modelleringen af Flow Accumulation, vil det være nødvendigt at sænke højdemodellen i de områder, hvor Aalborgs vandløb er placeret (vandløbs-tema Kort10), jævnfør beskrivelsen ovenover. Derefter kan Flow Accumulation modelleres, hvorved der skabes et afstrømningsmønster, som følger vandløbs-temaet fra Kort10, og som samtidig indeholder information omkring, hvor meget vand der strømmer til hver celle. Som det er beskrevet i fremgangsmåden for projektets modellering af vandudbredelse, skal der til vandløbene tilknyttes højdeværdierne fra højdemodellen. Først dette gøres, er det nødvendigt, at anvende en funktion på Flow Accumulation, således at de meget store værdier for Flow Accumulation ændres til små tal, eksempelvis i intervallet [0;1]. Værdien for Flow Accumulation i hver celle i vandløbet skal derefter multipliceres med vandløbets kote i den pågældende celle. På Figur 63 er det illustreret, hvilken effekt det vil have at inddrage Flow Accumulation i modelleringen af vandudbredelse. I en modellering heraf vil det være nødvendigt at undersøge, hvilken indflydelse vandføringen har i forhold til topografien på vandudbredelsen for dermed at kunne afgøre, hvilket interval Flow Accumulation skal strække sig over.



Figur 63: Figuren illustrerer, hvilken indflydelse forskellige værdier for Flow Accumulation (i intervallet [0;1]) har på forskellige steder af et vandløb. Vandløbet er illustreret med blå farve, hvor tykkelsen illustrerer hvor stor tilstrømningen er til vandløbet.

På første figur (Figur 63) beregnes Euclidean Allocation ud fra to punkter i vandløbet ved at multiplicere Flow Accumulation med koten i vandløbet. Dette giver hhv. 4,9 og 5. I den euklidisk allokerede raster vil det således være denne værdi, der er tilknyttet det sorte linjestykke mellem vandløbet og vandløbsmidten, da det for dette linjestykke gælder, at nærmeste kilde er de røde pletter. På anden figur udvælges to tilfældige punkter på linjestykkerne, hvor Euclidean Allocation er beregnet. For disse findes koten ud fra højdemodellen til henholdsvis 7,3 og 5,2. Ved til sidst at udføre beregningen *DHM – allokeringeraster* fås resultaterne til henholdsvis 2,4 og 0,2. Det vil sige, at det kræver en vandstandsstigning på 2,4 meter at oversvømme den gule prik på linjestykket til højre, mens det kun kræver en vandstandsstigning på 0,2 meter at oversvømme den gule prik på linjestykket til højre (betinget af at vandstrømmen ikke bremses på vejen af eksempelvis diger).

LITTERATUR

ArcGIS Desktop Help. Cost Distance, Cost Distance algorithm, How Fill works, How Flow Accumulation works, How Polygon To Raster (Conversion) works, Natural breaks (Jenks), Tan, Understanding Euclidean distance analysis. ArcGIS 10.0.

Arnbjerg-Nielsen, K. (2006). Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water Science & Technology*, Vol 54, No 6-7, s. 1-8.

Arnell, N. (2002). Urbanisation and industrial development. I *Hydrology and Global Environmental Change* (s. 107-111, 195-198). Pearson Education.

Berolo, W. (2007/2008). *Watershed and Stream Network Delineation*. Hentet 31. maj 2012, fra Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin:

http://www.hydroeurope.org/jahia/webdav/site/hydroeurope/shared/Exercices/GIS%20-%20Hydro%20Models/Watershed%20and%20Stream%20Network%20Delineation_Tutorial.pdf

Brivio, P. A., Colombo, R., Maggi, M., & Tomasoni, R. (2002). Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. *International Journal of Remote Sensing*, VOL. 23, NR. 3, s. 429-441.

Davie, T. (2008). Floods. I *Fundamentals of Hydrology* (s. 93-99). Routledge.

Forsyningsvirksomhederne, Aalborg Kommune. *Klimaforandringer - spild af planer eller spildevandsplaner?* Hentet 27. marts 2012, fra <http://www.forsyning.dk/media/56805/spildevandspjece.pdf>

Geodatabiblioteket. *AIS - Arealinformationssystemet 2000*. Hentet 16. maj 2012, fra Geodatabiblioteket: <http://www.geodatabiblioteket.dk/index.php?option=content&task=view&id=55&Itemid=46>

Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., & Laudon, H. (2009, 31. marts). Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *ScienceDirect, Journal of Hydrology*, s. 15.

Greve Forsyning. *Kloaksystemets opbygning og funktion*. Hentet 27. marts 2012, fra <http://greveforsyning.dk/dokumenter/brugerinformation/kloaksystemets%20opbygning%20og%20funktion.pdf>

Hansen, M. (2006, 15. august). *Vandskader for millioner*. Hentet 16. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2052868/3/vandskader-for-millioener>

Hellweger, F. (1997, 1. oktober). *AGREE - DEM Surface Reconditioning System*. Hentet 31. maj 2012, fra <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>

Henriksen, H. J., Nyegaard, P., Kern-Hansen, C., & Ovesen, N. B. *Kapitel 7. Vandkredsløbets regionale variationer og klimainput til den nationale vandressourcemodel*. Hentet 27. maj 2012, fra GEUS: <http://vandmodel.dk/FK-kapitel7-eBook.pdf>

Hewlett, J. D., & Hibbert, A. R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest Hydrology*, s. 275-291.

Holm, T. D. (2012, 6. februar). *Nordjylland ignoreres i ny plan*. Hentet 9. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/4068516/3/nordjylland-ignoreres-i-ny-plan>

Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, s. 446-460.

Hørmann, I. (2005, 22. juli). *Klædt på til vandgang*. Hentet 4. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/1653910/4/kl%E6dt-p%E5-til-vandgang>

Jørgensen, A. M., & Siewert, B. (2007). Drivhuseffekten, Danmark og Dagligdagen. *Geografisk Orientering*, s. 156-160.

Kloak, Aalborg Forsyning. *Fra spildevand til rekreativt land og vand*. Aalborg Forsyning.

KMS / Geografisk Infrastruktur, GIF@kms.dk . (2011). *Produktspecifikation, Danmarks Højdemodel, DHM/Terræn*. Kort & matrikelstyrelsen.

Kongsgaard, H. (2009, 11. august). *Skypumper og skybrud*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2853129/3/vand-lukker-kolonihave>

Kort & Matrikelstyrelsen. *Danmarks Højdemodel, DHM/Terræn*. Hentet 25. maj 2012, from Geodata-info: <http://www.geodata-info.dk/Portal/List.aspx>

Kort & Matrikelstyrelsen. *DTK/Kort100*. Hentet 9. maj 2012, fra Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen: http://www.kms.dk/Produktkatalog/Topografiske+data/DTK_-_Danmarks_Topografiske_Kortvaerk/DTK_Kort100.htm

Kort & Matrikelstyrelsen. *DTK/Kort500*. Hentet 9. maj 2012, fra Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen : http://www.kms.dk/Produktkatalog/Topografiske+data/DTK_-_Danmarks_Topografiske_Kortvaerk/DTK_Kort500.htm

Lenskjold, M. (2006, 16. august). *Oversvømmet af regn og kloakvand* . Hentet 16. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2052793/4/oversv%F8mmet-af-regn-og-kloakvand>

Lenskjold, M. (2006, 17. august). *Udsigt til tørvejr indendørs* . Hentet 16. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2054073/4/udsigt-til-t%F8rvejr-indend%F8rs>

Lenskjold, M. (2006, 16. august). *Vand i vaskeriet*. Hentet 16. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2052795/4/vand-i-vaskeriet>

Miljøministeriet. *Danmarks højdemodel (DHM)*. Hentet 2. april 2012, fra Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen: <http://www.kms.dk/Emner/Referencenet/dhm/>

Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen. *Indsamling og kvalitetskontrol af højdedata*. Hentet 25. maj 2012, fra Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen:
<http://www.kms.dk/Emner/Referencenet/dhm/indsamling/>

Miljøministeriet, Kort & Matrikelstyrelsen. (2006). *Kort10 - en del af den geografiske infrastruktur*. Kort & Matrikelstyrelsen.

Miljøministeriet, Naturstyrelsen. (2011, 25. marts). *Oversvømmelsesdirektivet*. Hentet 8. februar 2012, fra Miljøministeriet, Naturstyrelsen:
<http://www.naturstyrelsen.dk/Vandet/Klima/Oversvoemmelser/Direktivet/>

Miljøministeriet, Transportministeriet, Naturstyrelsen, Kystdirektoratet. (December 2011). *Endelig udpegnings af risikoområder for oversvømmelse*. Miljøministeriet; Transportministeriet; Naturstyrelsen; Kystdirektoratet.

Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1990, 6. september). Digital terrain modelling: A review and hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, Vol. 5 , s. 13-14.

Mortensen, A. G. (2007, 16. september). *Østerådal og kolonihaver under vand*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2498803/4/%F8ster%E5dalen-og-kolonihaver-under-vandklimaforandringer-aalborg-overvejer-at-tilbageholde-vand-i-dalen-for-at-undg%E5-oversv%E8mmelser-i-byen>

Nordjyske.dk. (2011, 30. november). *Sikring kunne ikke modstå vandet*. Hentet 9. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/4017530/3/sikring-kunne-ikke-modst%E5-vandet>

Nordjyske.dk. (2007, 30. september). *Uvej gav oversvømmelser i Nordjylland*. Hentet 9. april, 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2516029/3/uvej-gav-oversv%E8mmelser-i-nordjylland>

Odense Kommune. (2011, 5. maj). *Regnvand og spildevand*. Hentet 8. februar 2012, fra Kommuneplan 2009-2021:
<http://www.odense.dk/web3/kommuneplan/hovedstruktur/miljo/regnvand%20og%20spildevand.aspx>

Poulsen, T. L. (2009, 27. december). *Lov om vurdering og styring af oversvømmelsesrisikoen fra vandløb og søer*. Hentet 12. februar 2012, fra Retsinformation.dk:
<https://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=129372>

Ramsing, J. (2004, 11. februar). *Hjælp, min have drukner*. Hentet 4. april 2012, fra Nordjyske.dk:
<http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/1148710/4/hj%E6lp%2C-min-have-drukner>

Randers, C. (2007, 12. januar). *Højeste vandstand i Aalborg i mange år*. Hentet 16. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2215908/3/h%E8jeste-vandstand-i-aalborg-i-mange-%E5r>

Rasmussen, J. R., Pedersen, N. V., & Larsen, L. R. *Hydrologiske forbedringer af højdemodellen*. Hentet 26. maj 2012, fra BLOM: http://www.blomasa.com/ftp/Blom%20Denmark/pdf/Hydrologisk_hojdemodel.pdf

Schmidt, F., & Persson, A. (2003). Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Index. *Precision Agriculture 4* , s. 179-192.

Schouenborg, J. (2011, 15. december). *Kloakker skyld i ny oversvømmelse*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/4029884/3/--kloakker-skyld-i-ny-oversv%F8mmelse>

Schouenborg, J. (2005, 19. januar). *Slut med højvande i kælderen*. Hentet 4. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/1475442/4/slut-med-h%F8jvande-i-k%E6lderen>

Schouenborg, J. (2011, 19. december). *Vand lukker restaurant*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/4033447/3/vand-lukker-restaurant>

Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods as physical features. I *Floods: Physical Processes and Human Impacts* (s. 9-19) (s. 80-83). John Wiley & Sons.

Stenbro, L. (2011, 29. november). *Oprydning tager tid*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/4016232/3/oprydning-tager-tid>

Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2005, 31. august). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences* , s. 1807-1823.

Task Force for Klimatilpasning i Naturstyrelsen. (2011, 31. marts). *Implementering af EU's oversvømmelsesdirektiv - Forslag til udpegning af risikoområder i høring*. Hentet 8. februar 2012, fra Klimaportalen: <http://www.klimatilpasning.dk/da-dk/service/nyheder/marts2011/sider/implementeringafeusoversvommelsesdirektiv.aspx>

Termansen, L. (2006, 20. juni). *Vand i stride strømme over Aalborg*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/1996729/4/vand-i-stride-str%F8mme-over-aalborg>

Termansen, L. (2008, juli 27). *Vand lukker kolonihave*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/2853129/3/vand-lukker-kolonihave>

The European Parliament and the Council of the European Union. (2007, 23. oktober). DIRECTIVES. *Official Journal of the European Unio* , s. 288/29.

Tilsted, A. (2011, 24. juli). *Campingplads oversvømmet*. Hentet 9. april 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/3916030/3/campingplads-oversv%F8mmet>

Vestergård, W. (2010, 2. februar). *Bekendtgørelse om vurdering og risikostyring for oversvømmelser fra havet, fjorde eller andre dele af søterritoriet*. Hentet 12. februar 2012, fra Retsinformation.dk: <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=130042>

Ward, R. C., & Robinson, M. (2000). Runoff. I *Principles og Hydrology* (s. 232-287). McGraw-Hill Publishing Company.

World Meteorological Organization & Global Water Partnership. (2008, marts). *Urban flood risk management*. Hentet 23. april 2012, fra Slideshare: <http://www.slideshare.net/Micheal22/urban-flood-risk-management>

Wormslev, S. (2011, 15. december). *Der var stormflod i hele fjorden*. Hentet 16. februar 2012, fra Nordjyske.dk: <http://www.nordjyske.dk/artikel/10/5/2/4029474/4/der-var-stormflod-i-hele-fjorden>

Aalborg Byråd. (2009). *Åbning af Østerå gennem byen som en åben og ren å i eget forløb*. Hentet 24. april 2012, fra Udskrift af beslutningsprotokollen, Mødet den 10.08.2009: http://www.google.dk/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aalborgkommune.dk%2F_controls%2FPageLayoutsControls%2FPdf.aspx%3Fpdfnavn%3D16114172.PDF%26type%3Dpunkt&ei=U9qXT93jDobMswaV1_jAAQ&usg=AFQjCNEIS7Loje1LI0k

Aalborg Forsyning. *Bydelsplaner*. Hentet 29. marts 2012, fra Aalborg Forsyning: <http://aalborgforsyning.dk/planerforside/spildevandsplan/kortbilag/kortbilag.aspx>

Aalborg Forsyning. *Skema 1.2 Regnbetingede udledninger fra K-områder*. Hentet 29. marts 2012, fra Aalborg Forsyning, Spildevandsplan: http://aalborgforsyning.dk/media/57045/skema_1.2.pdf

Aalborg Forsyning. *Spildevandsplan*. Hentet 28. marts 2012, fra Aalborg Forsyning: <http://www.forsyning.dk/planerforside/spildevandsplan/kortbilag/kortbilag.aspx>

Aalborg Forsyning, Kloak A/S. *Vision 2100 -samt udviklingsplan frem til år 2025*.

Aalborg Kommune. (2011). *Klimastrategi - Tilpasning 2012-2015*. Aalborg: Aalborg Kommune.

Aarhus Kommune. (2007, november). En tolkning af EU's "Oversvømmelsesdirektiv" med fokus på oversvømmelser i byer. DHI.

BILAG I: ARTIKEL RESEARCH

- 19.12.2011: Beboere på havnefronten i Nørresundby rammes af oversvømmelser pga. storm. (Schouenborg, Vand lukker restaurant, 2011)
- 15.12.2011: Mellem Broerne oversvømmes på Nørresundby Havnefront pga. at vand fra Limfjorden kommer op fra kloakledningerne. (Schouenborg, Kloakker skyld i ny oversvømmelse, 2011)
- 15.12.2011: Alle kystområder og øer i fjorden oversvømmes pga. storm. (Wormslev, Der var stormflod i hele fjorden, 2011)
- 29.11.2011: Oversvømmelse ud for jobcentret på Vestre Havnepromenade pga. storm. (Stenbro, 2011)
- 24.07.2011: Strandparken Camping Aalborg oversvømmes pga. regnvejr. (Tilsted, 2011)
- 11.08.2009: Kældre i Vejgaard og Aalborg Øst oversvømmes pga. regnvejr, hvorved kloakvand kommer op gennem indvendige riste. (Kongsgaard, 2009)
- 27.07.2008: Kolonihaveforening Kildely oversvømmes pga. stigende tryk på Øster Å, hvorved Østre og Vestre Landgrøft går over deres bredder. (Termansen, Vand lukker kolonihave, 2008)
- 30.09.2007: Viadukt under Reberbansgade oversvømmes pga. regnvejr. (Nordjyske.dk, 2007)
- 16.09.2007: Østerådal og kolonihaveforeningerne Engen og Ådalen oversvømmes med mellemrum. (Mortensen, 2007)
- 12.01.2007: Oversvømmelse af alle søsportsklubber ved Vestre Bådehavn og ved Aalborg Roklub pga. høj vandstand og storm. (Randers, Højeste vandstand i Aalborg i mange år, 2007)
- 17.08.2006: Kolonihusene i haveselskabet Ålykke i Kærby oversvømmes. (Lenskjold, Udsigt til tørvejr indendørs, 2006)
- 16.08.2006: Den lavest liggende del af Tornhøjparken i Aalborg Øst oversvømmes pga. regnvejr og da kloakkerne er underdimensioneret. (Lenskjold, Oversvømmet af regn og kloakvand, 2006)
- 16.08.2006: Regionsvaskeriet på Svendborgvej i Aalborg Øst oversvømmes. (Lenskjold, Vand i vaskeriet, 2006)
- 15.08.2006: Idémøbler på Nålemagervej oversvømmes ved at nærliggende å går over sine bredder. Reserverlager Nor på Vardevej oversvømmes pga. at nærliggende sø går over sine bredder. (Hansen, Vandskader for millioner, 2006)
- 20.06.2006: Vandtryk fik kloakdæksler til at løfte sig langs strækningen Nyhavnsvej-Peder Skrams Gade pga. skybrud og da kloakkerne er underdimensioneret. (Termansen, Vand i stride strømme over Aalborg, 2006)

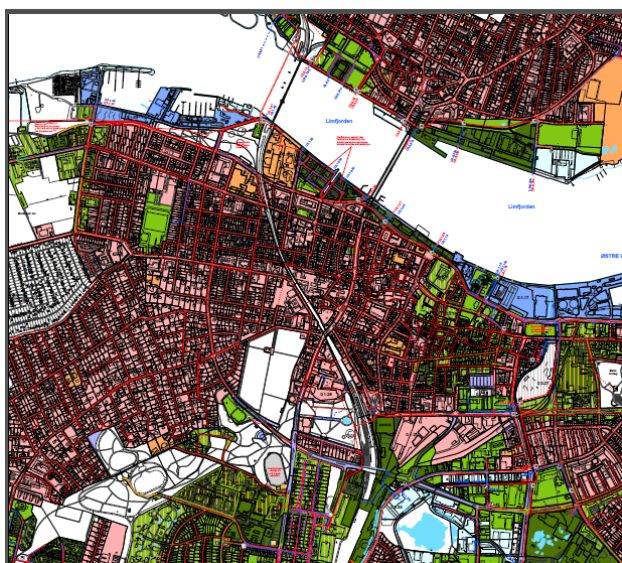
22.07.2005: Roklubben Ægirs lokaler på Søsportsvej i Aalborg Vestby oversvømmes pga. mange dage med regn. (Hørmann, 2005)

19.01.2005: Kældre i Vejgaard og Øgadekvarteret oversvømmes ved kraftigt regnvejr. De sidste fem år er kloaksystemet ved Nørre Tranders Vej og Øster Sundby Vej udbedret, fordi området var ramt af oversvømmelser. Nu skal kloaksystemet ved Hadsundvej og Østre Alle samt Øgadekvarteret udbedres. (Schouenborg, Slut med højvande i kælderen, 2005)

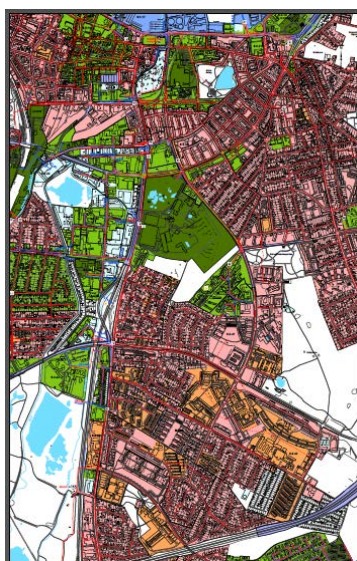
11.02.2004: Villa på Ladegårdsvej i Visse får oversvømmet haven pga. af at grundvandet har genfundet sit normale niveau. (Ramsing, 2004)

BILAG II: OVERSIGT OVER FÆLLES- OG SEPARATKLOAKEREDE OMRÅDER I AALBORG

Kort er fundet fra (Aalborg Forsyning) og viser hvilke områder, der er fælleskloakeret (lyserød) og separatkloakeret (grøn) i Aalborg. Nederst i bilaget ses en signaturforklaring til kortene. Fra (Aalborg Forsyning)



Figur 64: Midtbyen og Vestbyen



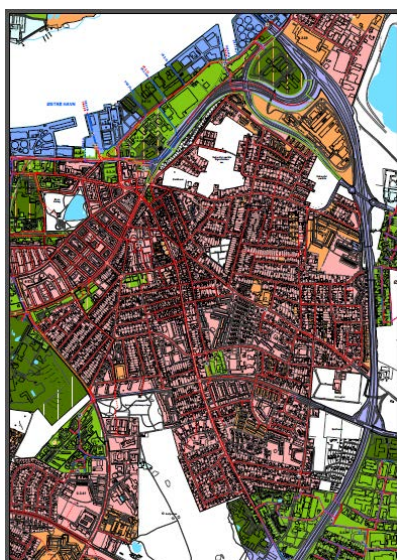
Figur 65: Øgaden og Grønlænderkvarteret



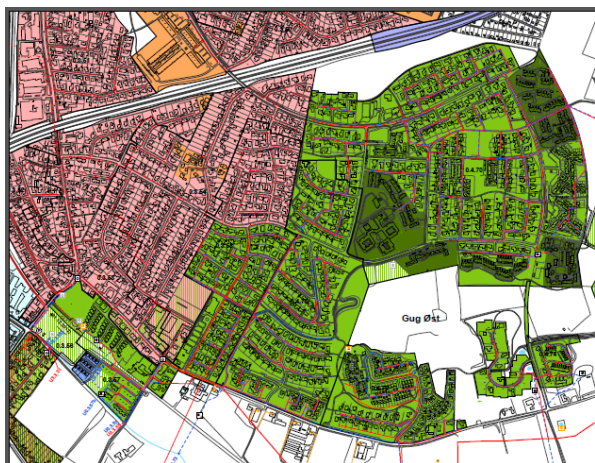
Figur 66: Hasseris



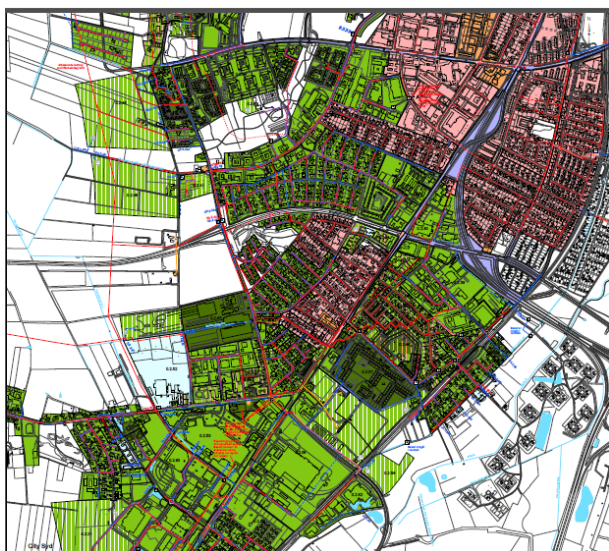
Figur 67: Hobrovej Kærby



Figur 68: Vejgaard



Figur 69: Gug Øst



Figur 70: Sofiendal Skalborg



Figur 71: Tornhøj



Figur 72: Øster Sundby

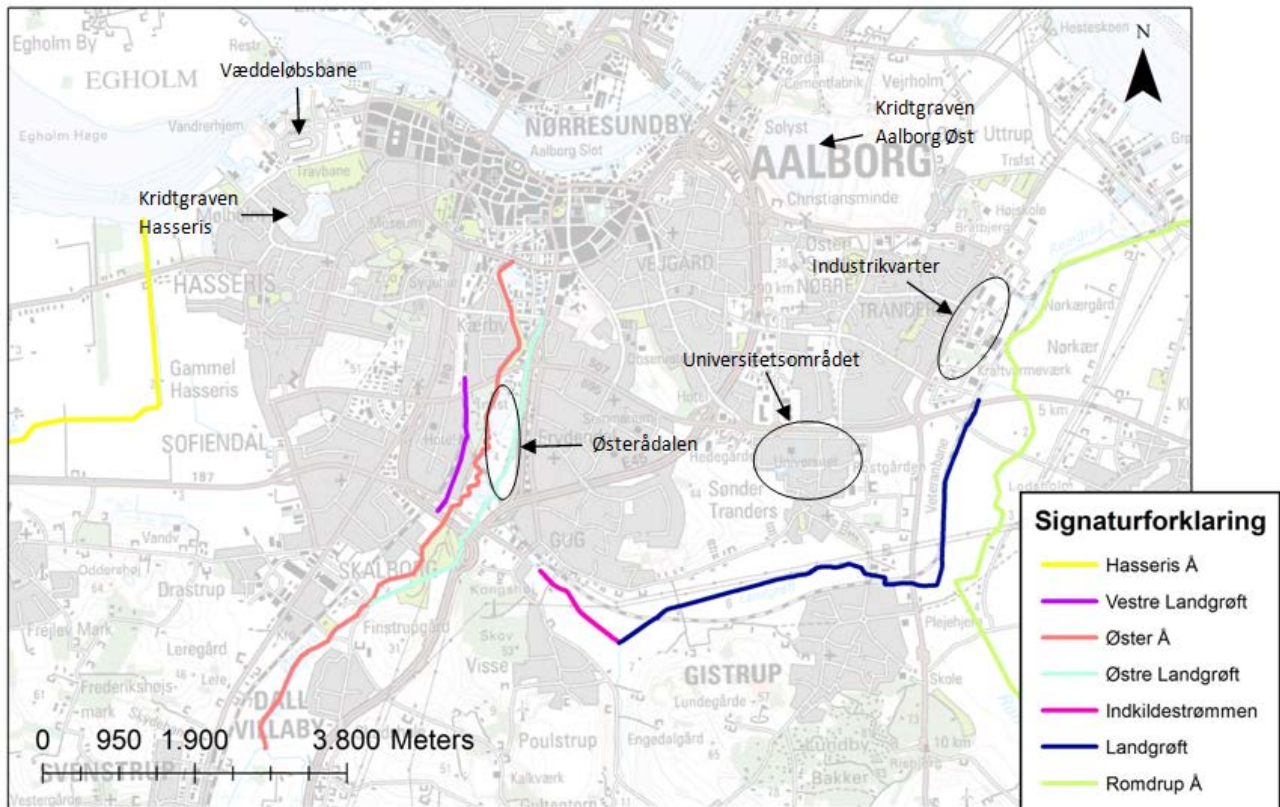


Figur 73: City Syd

Signaturforklaring:	
Status / Plan	Kloakeringsprincip:
	Fælleskloak
	Separatkloak
	Spildevandskloak
	Overfladevandskloak
	Andet
	Fællesprivat - fælleskloak
	Fællesprivat - separatkloak
	Fællesprivat - spildevandskloak

BILAG III: PLACERING I AALBORG

Placering af kandidatafhandlingens omtalte vandløb og områder:



BILAG IV: UDKLIP AF HØJDEMODEL

I dette bilag redegøres der for, hvordan det er valgt at udklippe den anvendte højdemodel, således at beregningshastighed i ArcGIS for projektets modelleringer optimeres. Fremgangsmåden for udklippet ses af Figur 74.

Da vandløbenes strømningsmønstre vil blive undersøgt i projektets GIS-analyser, vælges det at udklippe højdemodellen efter de oplande, som deler Aalborg. Til at finde disse oplande benyttes Spatial Analyst værktøjet Basin. For at benytte dette værktøj er det dog nødvendigt først at bestemme strømningsretningerne, hvilket gøres via værktøjet Flow Direction. For at tage højde for afstrømning væk fra lavninger i terrænet, vælges det at fylde hullerne og lavningerne i højdemodellen. Til dette anvendes Spatial Analyst værktøjet Fill. Værktøjet Fill anvender funktionerne Focal Flow, Flow Direction, Sink, Watershed og Zonal Fill til at lokalisere og fylde lavninger i terrænet (ArcGIS Desktop Help). En fyldning af huller i højdemodellen får i sidste ende indflydelse på udformningen af oplande, hvor der ved brug af Fill fremkommer store oplande, mens der uden brug af Fill fremkommer mange små oplande. Nogle af de huller, som er i højdemodellen, skyldes fejl i opløsning af data eller afrunding af højden til nærmeste heltalsværdi (ArcGIS Desktop Help), derfor vurderes det, at der ved fjernelse af hullerne fremkommer oplande, der er anvendelige til videre analyse. I den forbindelse skal det påpeges, at det vælges at fylde alle huller uanset dybde. Med udfyldning af lavninger og huller, er det nu muligt at finde Flow Direction.

Flow Direction: Flow Direction angiver vandets strømningsretning på jordoverfladen. For hver en celle i højdemodellen måles faldet i højden til cellens otte naboceller. Disse højdeforskelle sammen med afstanden mellem cellen og dens naboceller bestemmer strømningsretningen, hvilket kan opstilles på følgende form:

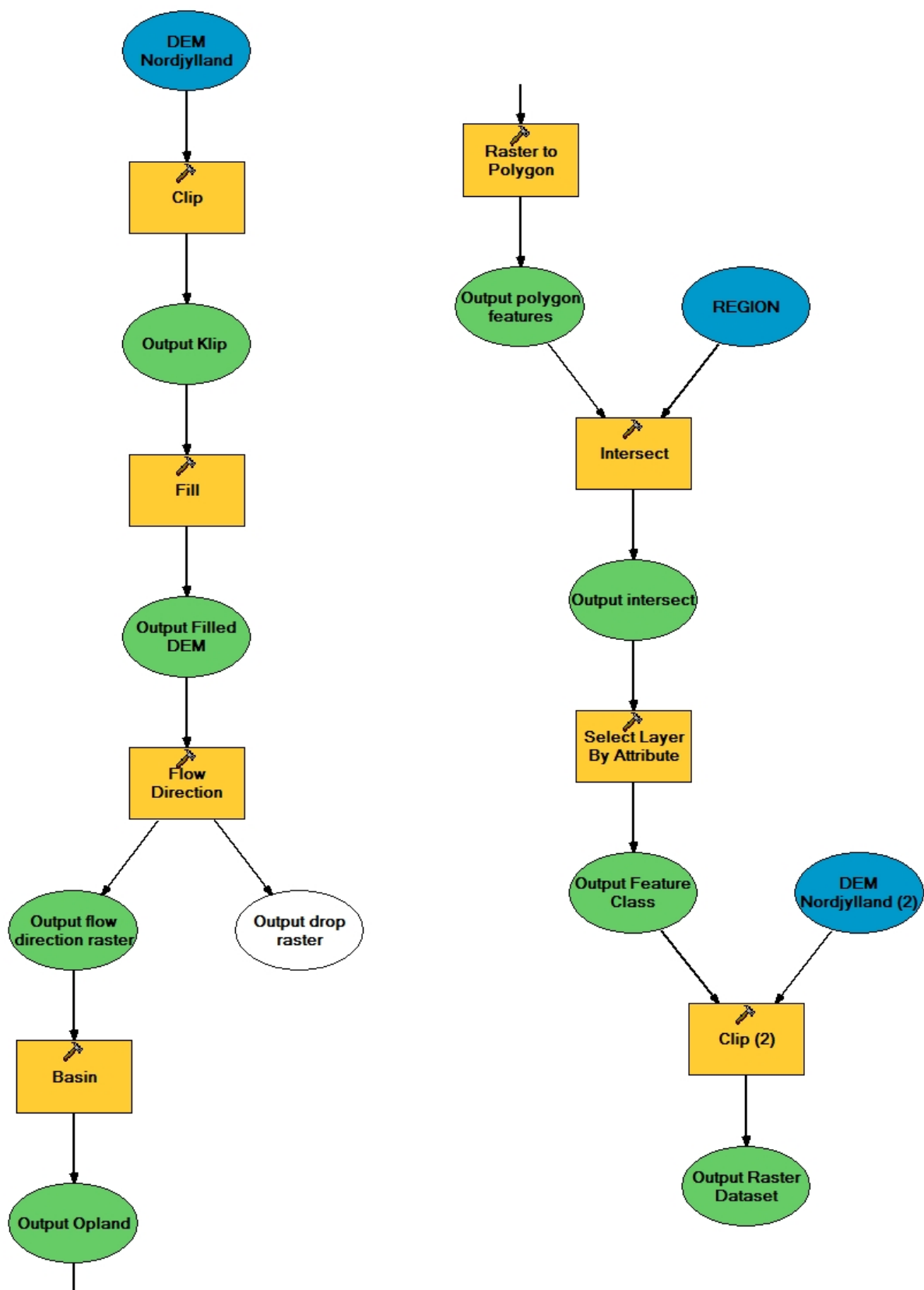
$$\text{ændring i Z-værdi/afstand} \cdot 100$$

Afstanden vil afhænge af nabocellens placering i forhold til cellen. Står nabocellen vinkelret på cellen, så er afstanden 1, og står nabocellen diagonalt for cellen, er afstanden 1,414. Strømningsretningen vil således være fra cellen til den nabocelle, hvor ligningen ovenover giver den største værdi. Er det tilfældet, at flere naboceller har ens fald, vil det undersøgte område forstørres ind til det største fald i højde kan bestemmes. (ArcGIS Desktop Help)

Ved brug af strømningsretningerne kan ArcGIS finde oplande ved Spatial Analyst værktøjet Basin.

Basin: Ud fra Flow Direction lokaliserer ArcGIS via værktøjet Basin højedrag mellem oplande, hvor strømningsretningerne går i hver sin retning. Derved identificeres alle de strømningsretninger, som bidrager til samme afvandingsområde. (ArcGIS Desktop Help)

Der udvælges herefter to oplande, som Aalborg by strækker sig over, ved brug af værktøjet Select Layer By Attribute. Til sidst er det muligt, at klippe højdemodellen efter oplandene ved brug af Data Management værktøjet Clip.



Figur 74: Modelbuilder for ud klip af højdemodellen efter oplande.