

Hydraulisk model for Rødby Fjord oplandet



Januar 2014

Indholdsfortegnelse

1 Resumé.....	4
2 Baggrund.....	6
3 Modelvalg.....	8
3.1 Konceptuel model.....	8
3.1.1 Strømning i vandløbene.....	9
3.2 Rødby Fjord modellen.....	10
4 Data. Kilder og behandling.....	13
4.1 Vandløb	13
4.1.1 Geo-referering.....	13
4.1.2 Styrte.....	14
4.1.3 Grødeskæring.....	16
4.2 Klima.....	17
4.2.1 Nedbør.....	17
4.2.2 Temperatur.....	20
4.2.3 Indstråling.....	21
4.2.4 Potentiel fordampning.....	21
4.3 Højdemodel.....	23
4.4 Arealanvendelse.....	26
4.4.1 Jordtyper.....	27
4.4.2 Befæstelsesgrad.....	28
4.4.3 Bymæssig tilledning.....	28
4.5 Udpumpning/afstrømning.....	29
4.6 Vandstandsloggere.....	32
4.7 Observationer fra oversvømmelser.....	32
5 Model. Opstilling, kalibrering, test.....	35
5.1 Daisy.....	35
5.1.1 Opstilling.....	36
5.1.2 Kalibrering.....	37
5.2 HEC-RAS.....	39
5.2.1 Opstilling.....	40
5.2.2 Kalibrering.....	44
5.2.3 Modeltest.....	45
5.3 Rødby Fjord modellen.....	51
5.3.1 Modeltest.....	51
5.3.2 Validering mod udbredelse af oversvømmelser.....	53
6 Hydrologiske/hydrauliske analyser.....	55
6.1 Fjernelse af styrte.....	55
6.2 Afstrømning fra bymæssige og befæstede arealer.....	57
6.2.1 Kortvarigt overløb fra byområder.....	58
6.3 Udpumpning fra Hummingen.....	64
6.4 August 2011.....	65
6.4.1 Vandstand ved Kramnitse.....	65
6.4.2 Grødeskæring.....	66
6.4.3 Falster.....	68
6.5 Effekt af ændret dræning.....	69

7 Klimascenarier.....	71
7.1 Klimafremskrivning.....	71
8 Serviceniveau.....	74
8.1 Kritiske hændelser.....	74
8.2 Rødby fjord systemets nuværende kapacitet.....	75
8.3 Gentagelsesperioder og nuværende serviceniveau.....	79
8.4 Klimaændringer.....	83
8.5 Oversvømmelseskort.....	86
8.6 Tiltag i forhold til serviceniveau	92
8.6.1 Grødeskæring.....	92
8.6.2 Udvidelse af Rødby Kanal.....	94
8.6.3 Kontrolleret oversvømmelse.....	97
8.7 Vurdering af usikkerhed og sikkerhed.....	97
9 Konklusion og anbefalinger.....	99
10 Referencer.....	100
11 Appendiks.	101
11.1 Beskrivelse af dataformater.....	101
11.1.1 CSV format.....	101
11.1.2 Shapefiler.....	102
11.1.3 KML filer.....	103
11.1.4 SDS filer	105
11.2 Figurer i stort format.....	106

1 Resumé

I august 2011 faldt der 110 mm nedbør over en periode på 7 dage i Rødby Fjord, hvilket gav anledning til oversvømmelser af landbrugsområder. Oversvømmelsen var særlig kritisk fordi den fandt sted om sommeren medens der stod afgrøder på markerne og dermed betød økonomiske tab for de ramte landmænd.

Oversvømmelsen gav anledning til en række spørgsmål fra områdets landmænd og beboere. Kunne oversvømmelsen have været undgået hvis pumperne havde haft større kapacitet, hvis kanalene havde være bredere, hvis grøden havde været skåret yderligere, hvilken betydningen havde de styrt som findes i systemet og hvor ofte skal vi forvente at lignende oversvømmelser?

For at besvare disse og andre spørgsmål og for at bidrage til den generelle forståelse af de hydrologiske forhold for Rødby Fjord igangsatte Lolland Kommune i samarbejde med områdets interessenter en i januar 2013 et projekt. I projektet, som er afsluttet i januar 2014, er alle data med relevans for områdets hydrologi samlet, organiseret, og analyseret. Der er opstillet integreret numerisk model for oplandets marker og vandløb – Rødby Fjord modellen. Der er etableret loggere, som løbende registrerer vandstande fire steder i vandløbene. De målte vandstande er anvendt til kalibrering og validering af den opstillede model. Loggerne fortsætter deres målinger også efter projektets afslutning, og vil dermed bidrage til yderligere viden om områdets hydrologiske forhold.

Der skelnes i alle analyser mellem vækstperioden og vinterperioden, idet der i vækstperioden er større hydraulisk modstand i vandløbene på grund af grødevækst i forhold til vinterperioden. Yderligere er oversvømmelser i vækstperioden mere kritiske fordi, sådanne oversvømmelser kan medføre tab af høstudbytte.

Modelberegninger med Rødby Fjord modellen og statistiske analyser viser, at oversvømmelsen i august 2011 har en statistisk gentagelsesperiode på 37 år. Kritiske forhold, med oversvømmede landbrugsområder kan i gennemsnit forventes hvert 32. og 14. år for henholdsvis vækstperioden og vinterperioden.

Siden oversvømmelsen i august 2011 er der indført ekstra grødeskæring midt på sommeren. Resultater fra Rødby Fjord modellen viser denne praksis forlænger gentagelsesperioden for kritiske hændelser i vækstperioden fra 17år til de nuværende 32 år. Beregningerne viser også at oversvømmelsen i august 2011 ikke kunne have været fuldstændig undgået, hvis sommergrødeskæringen havde været indført på daværende tidspunkt, men udbredelsen og varigheden af oversvømmelsen ville have været signifikant reduceret.

Der er gennemført modelberegninger af konsekvenser af fjernelse af styrt i vandløbene. Resultaterne fra disse beregninger viser, at fjernelse af styrt kun vil have betydningen for vandstande i umiddelbar nærhed af disse og altså ikke give generelle forbedringer i forhold til oversvømmelsesproblematikken.

Analyser viser, at forøgelse af pumpekapaciteten på Kramnitse pumpestation ikke vil formindske områdets risiko for oversvømmelse. Det er vandløbenes svage hældning, som betyder, at vandet ved situationer med høj afstrømning opstaves i vandløbssystemet.

Udvidelse eller uddybning af vandløb og kanaler vil reducere risikoen for oversvømmelse. En udvidelse af kanalbreden med 20 % på den mest udsatte to kilometers strækning på Rødby kanal,

vil forøge den statistiske gentagelsesperioder for kritiske situationer fra 32 år til 37 år i vækstperioden og fra 14 år til 27 år i vinterperioden. Udvidelsen vil ikke give mærkbare forbedringer i forhold til oversvømmelse i de øvrige dele af kanalsystemet.

Tilledning fra byområder vil i forbindelse med kraftige nedbørshændelser kunne oversvømme enkelte mindre opdyrkede områder langs Rødby kanal og Kirkenorsløbet. Varigheden af sådanne oversvømmelser vil være mindre end et døgn.

Den generelle antagelse i forhold til klimaets påvirkning af fremtidige nedbør er, at der vil komme mere nedbør om vinteren, sommeren vil blive tørrere, og hyppigheden og intensiteten af de ekstreme nedbørshændelser vil øges. For Rødby Fjord, som er helt domineret af opdyrkede områder, udgør rodzonen og jorden over drænene et stort magasin, som kan tilbageholde store mængder vand. Der, hvor problemerne opstår i Rødby Fjord, er derfor situationer, hvor der gennem længere tid har været vedvarende nedbør og jordens magasineringsskapacitet er opbrugt forud for en kraftig nedbørshændelse. Det er altså snarere mønsteret i nedbøren end den enkelte nedbørshændelse, som er vigtig. For at undersøge klimaændringerne påvirkning af hyppigheden af oversvømmelser i Rødby Fjord er der gennemført modelberegninger, hvor fremskrevet klima fra tre forskellige klimamodeller. Resultaterne viser, at der må forventes hyppigere oversvømmelser i vinterperioden, mens resultaterne ikke giver nogen entydig konklusion for vækstperioden.

2 Baggrund

Denne rapport dokumenterer opsætningen af en integreret model for Rødby Fjord oplandet samt scenarieløser. Formålet er at belyse oversvømmelser i området, at etablere en fælles forståelse blandt områdets interessenter i forhold til de hydrauliske forhold og vurdere effekten af forskellige tiltag. Projektet er udført af HydroInform ApS og LNH-water ApS for Lolland Kommune.

Anledningen til projektet var, at der i august 2011 faldt 110 mm nedbør over en periode på 7 dage i Rødby Fjord, hvilket gav anledning til oversvømmelser af flere landbrugsområder.

Oversvømmelsen var særlig kritisk, fordi den fandt sted om sommeren, mens der stod afgrøder på markerne, og dermed betød økonomiske tab for de ramte landmænd. Oversvømmelsen gav anledning til en række spørgsmål fra områdets landmænd og beboere. Kunne oversvømmelsen have været undgået:

- hvis der ikke havde været styrt?
- hvis kanalerne havde være bredere?
- hvis der ikke havde været tilløb fra byerne?
- hvis pumperne havde haft større kapacitet?
- hvis grøden havde været skåret yderligere?

Og ikke mindst, hvor ofte kan der forventes oversvømmelser i fremtiden?

For at besvare disse spørgsmål og for at bidrage til den generelle forståelse af de hydrologiske forhold for området igangsatte Lolland Kommune et projektet i samarbejde med områdets interessenter.

Modelområdet er det hydrologiske opland til Kramnitse pumpestation, som vist med rød linje på figur 2. Oplandets areal er omkring 200 km², hvoraf en stor del har terrænkoter på under nul (markeret med lyseblåt på figur 2). Pumperne er dimensioneret til en maksimal afstrømning på 100 l/s/km², hvilket svarer til 9 mm/døgn eller 20 m³/s. Området er et intensivt dyrket landbrugsområde. Det indeholder byerne Rødby og Holeby samt sommerhusområderne Kramnitse og Hummingen.



Figur 1:Luftfoto af oversvømmelse i august 2011 ved Kirkenorsløbet med Rødby i baggrunden.



Figur 2: Oplandsgrænse og hovedkanaler.

Rapporten er struktureret således, at først beskrives områdets hydrologi, hvilket giver baggrunden for valget af numeriske modeller til modelsystemet. Derefter følger et afsnit med beskrivelse af alle input data. Så beskrives modelopsætningen og kalibreringen, hvorefter de egentlige modelkørsler og resultater gennemgås.

3 Modelvalg

Hovedformålet med nærværende projekt og den opstillede model er at vurdere afstrømningsområdet evne til at dræne området på lang sigt, hvor der må påregnes ændrede klimatiske forhold. Herunder at vurdere hydrauliske konsekvenser af forskellige tiltag til at imødegå ændrede klimaforhold. Sådanne tiltag kan for eksempel være ændret praksis for grødeskæring, ændringer af kanalernes geometri og ændringer på bygværk som styrt og pumpe. Modellsystemet skal kunne bidrage til bestemmelse af hyppigheden af hydraulisk kritiske forhold både med det eksisterende system og med tiltag, som nævnt ovenfor, og dermed bidrage til at træffe kvalificerede beslutninger.

3.1 Konceptuel model

Når nedbøren falder på en mark i vækstperioden, vil regnen optages af planterne og fordampe igen fra planternes blade eller fra jordoverfladen. Er nedbørsmængden større end fordampningen, vil der ske opfugtning af rodzonen. Fortsætter regnen, vil vandindholdet blive større end markkapaciteten, og vandet strømmer nedad. Længere nede ved drænene opstår der vandmættede forhold, hvilket tillader vandet at trænge ind i drænene. Er nedbørsintensiteten større end den hastighed, som jorden kan lede vandet ned mod drænene med, vil der opstå områder med vand på terræn. Typisk, og i særlig grad på de flade områder i Rødby Fjord, vil overfladevandet blive stående i små lavninger på marken. Uden for vækstperioden er fordampningen lille, hvilket betyder, at jorden store dele af tiden vil have et vandindhold svarende til markkapacitet. Nedbør, som falder under sådanne forhold, vil umiddelbart give anledning til tilstrømning til drænene. Fra drænene strømmer vandet til vandløbene, hvor det vil få vandstanden til at stige. Stiger vandstanden op over drænenes udløb, vil det påvirke afdræningen fra marken, og stiger den op over terræn, giver det oversvømmelser.

Nedbør, der falder på befæstede arealer i kloakerede områder, kan ledes til kloak, hvorfra der kan ske overløb til vandløb.

I sidste ende når vandet pumpestationen ved Kramnitse, hvor det pumpes ud.

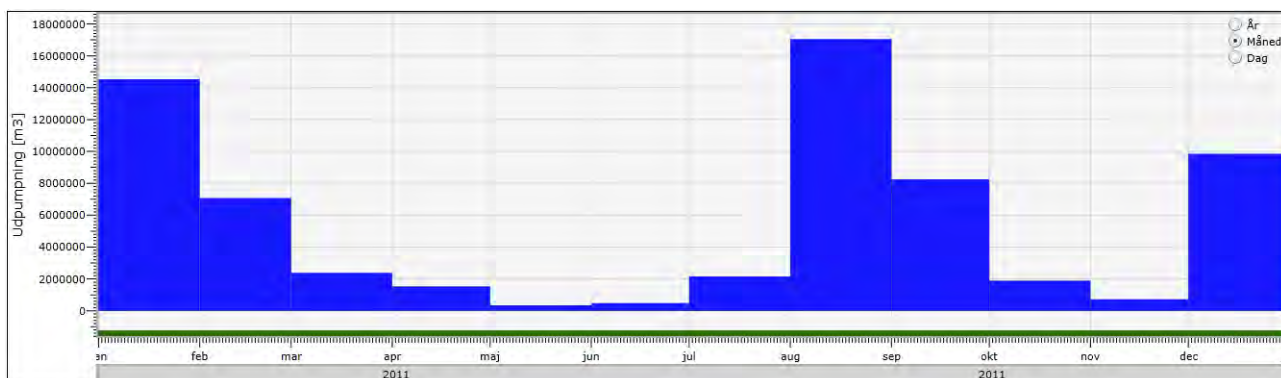
De betydende processer, vi har identificeret i overstående beskrivelse, og som modellen skal håndtere, er således:

1. Nedbør (historisk og fremtidig)
2. Fordampning (herunder plantevækst)
3. Strømning i rodzonen til drænene
4. Urban afstrømning
5. Strømning i vandløbene

Bemærk, at det ikke er nødvendigt at modellere grundvand dybere end drænene. Det skyldes, at området er meget fladt, og at der ikke foregår betydende grundvandsindvinding. Ligeledes vurderer vi, at det ikke er nødvendigt at inddrage indstrømning fra havet via grundvandet. Vores vurdering er, at indstrømningen er af mindre betydning, også selv om vandstanden i havet skulle stige.

Figur 3 viser udpumpningen ved Kramnitse i 2011, og det ses, at der er stor forskel på udpumpningen i de forskellige måneder. I forårmånederne og november er udpumpningen meget

lav. Havde grundvandsindtrængningen fra havet været af samme størrelsesorden som nettonedbøren, ville udpumpningen have et højere minimumsniveau.



Figur 3:Udpumpningen ved Kramnitse på månedsniveau i 2011.

Ligeledes mener vi heller ikke, at det er nødvendigt at modellere vandets strømning på terræn, fordi hovedstrømningen typisk vil foregå i vandløbene.

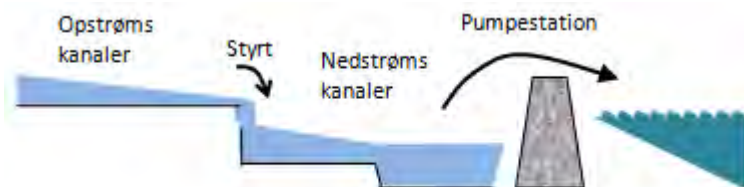
I nedenstående afsnit gennemgås de dominerende processer i detaljer.

3.1.1 Strømning i vandløbene

Kanalsystemet i Rødby Fjord og de opstrøms vandløb er karakteriseret ved at have lille fald (hældning). Med de strømningshastigheder vi har i Rødby Fjord systemet er vandstandene altid alene afhænge af vandføringen samt de forhold som gør sig gældende nedstrøms. Man skal altså kikke nedad vandløbet for at finde årsagen til vandstanden på et pågældende sted. Der er fire ting som under stationære forhold tilsammen bestemmer vandstanden:

1. Vandløbsbundens hældning i strømretningen
2. Vandstanden ved den nedstrøms ende af vandløbet
3. Vandløbets hydrauliske modstand
4. Vandføringen

For de kanaler, hvor der etableret styrt, er vandstanden ved nedstrøms ende givet ved overløbshøjden over styrtet. For de øvrige kanaler er vandstanden ved nedstrøms ende givet ved vandstanden umiddelbart foran pumpestationen.



Figur 4:Skematisk fremstilling af vandets strømning i kanalerne.

Vandløbets hydrauliske modstand bestemmes af vandløbets tværsnitsgeometri, vandløbets hydrauliske ruhed (oftest hovedsageligt bestemt af mængden af vegetation i vandløbet), og enkeltmodstande i form af rørunderføringer, indsnævring ved broer, risteværker, mv. Vandføringen bestemmes af tilløb fra markdræn og bymæssige tilløb fra befæstede områder, og tilskud fra indstrømmende grundvand.

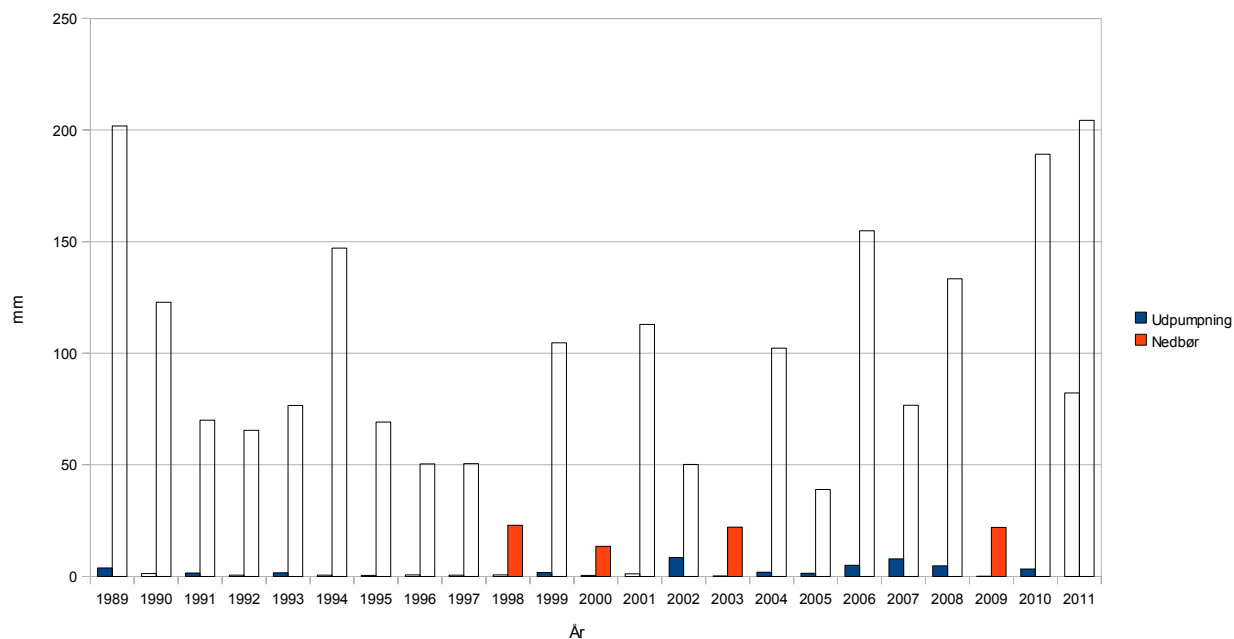
3.2 Rødby Fjord modellen

Vandløbsmodellering foretages ofte med en hydraulisk model alene, hvilket er tilstrækkeligt, når problemstillingen handler om nuværende klimatiske forhold, idet man kan basere afstrømningen på målte afstrømningsdata. Men skal man kunne forudse hydrauliske konsekvenser af et ændret klima, er det nødvendigt at inddrage modeller, som simulerer den effekt som fordampning, infiltration og opmagasinering i rodzonen har. Dette er i høj grad relevant for Rødby Fjord, hvilket kan tydeliggøres med den betragtning, at kanalsystemet og pumpens kapacitet på 100 liter/s/km², kun svarer til en afstrømning på 9 mm/døgn. For nettonedbør på over 9 mm/døgn er områdets sikkerhed mod oversvømmelse alene afhængig af rodzonens evne til at opmagasinere vand. Er rodzonen allerede fuldt opfugtet, når en kraftig regnhændelse indtræffer, kan der opstå oversvømmelse. Derfor er Rødby Fjord sårbart over for langvarig nedbør, hvilket blev tydeliggjort under oversvømmelsen i august 2011.

I nedenstående tabel har vi samlet de største nedbørshændelser (mm) på dagligt niveau siden 1989 målt ved renseanlægget i Nakskov.

28. August 1989	130.79
12. August 2010	93.68
15. September 1994	66.32
21. May 2000	55.05
29. June 2012	54.52
16. June 2007	49.23
21. July 2002	48.67
2. August 1994	47.41
27. August 1989	44.79
17. October 2002	44.27
13. August 2004	44.21
11. August 2011	43.61

Her ses det, at den 11. august 2011 blot er den 12. største nedbørshændelse, og derfor ikke i sig selv stor nok til at give oversvømmelse. På grafen nedenunder har vi opsummeret den månedlige nedbør for samtlige august måneder siden 1989. Her ses 2011, at være en af de største, men stadig ikke voldsomt meget større end andre år. På den samme graf har vi vist udpumpningen ved Kramnitse, og her ses tydeligt, hvordan udpumpningen i august 2011 var markant større end tidligere august måneder. Udpumpningen er et godt mål for oversvømmelsen, idet en stor udpumpning må have betydet en stor strømning og dermed høj vandstand.

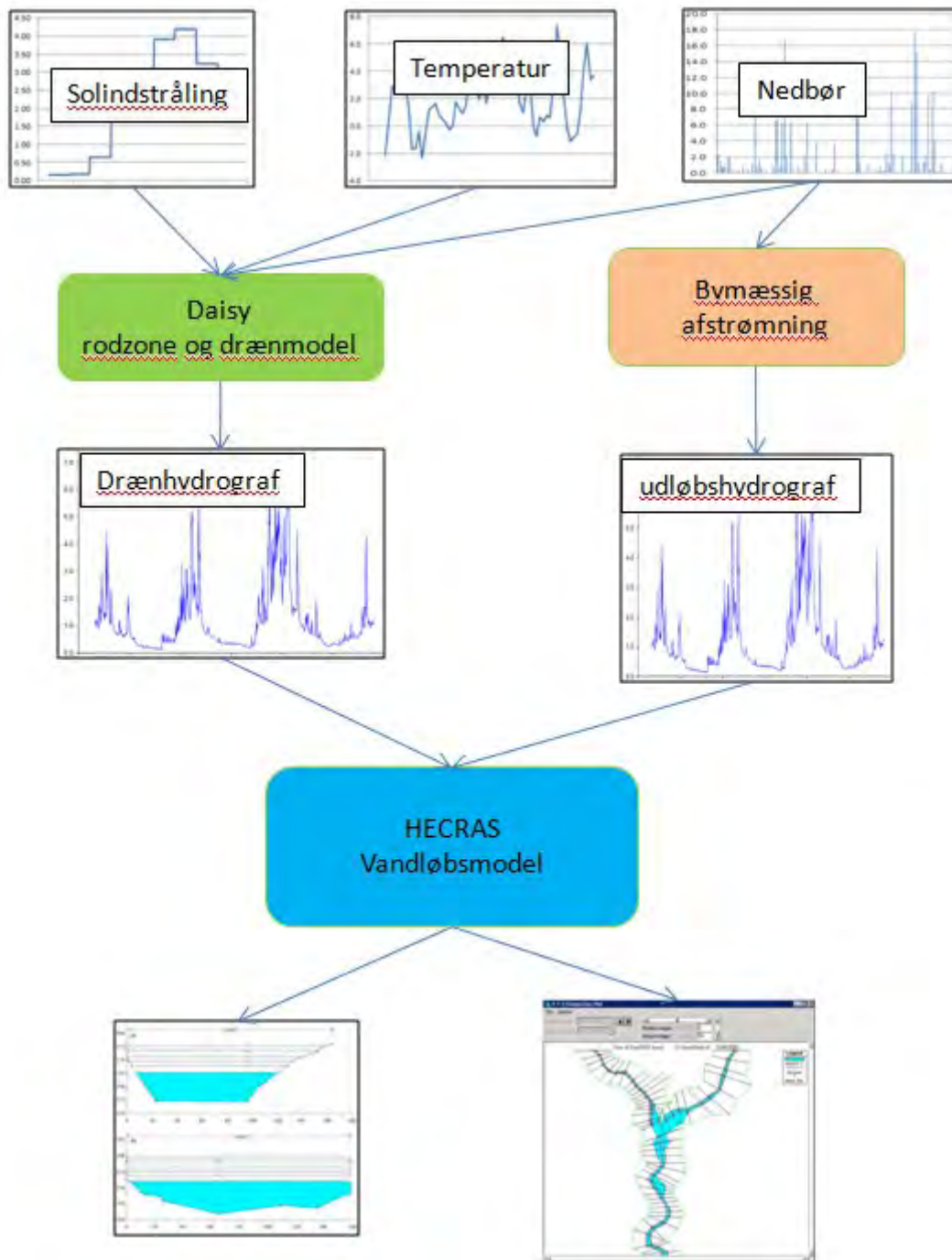


Figur 5: Nedbør og udpumpning i august for forskellige år.

At man ikke direkte kan oversætte en bestemt nedbørshændelse til en oversvømmelse er en central del af projektet. Det er baggrunden for, at der er nødvendigt at anvende Daisy-modellen, som holder styr på, hvor meget vand der er i rodzonen således at det kan beregnes hvor meget afstrømning en given hændelse vil give på et givent tidspunkt.

Det er altså ikke alene den enkelte regnhændelse, som afgør, om der opstår kritiske forhold, men kombinationen af regnhændelsen og den fordampning og nedbør, som har fundet sted i perioden forinden.

Modellsystemet, som anvendes er, Daisy til modellering af rodzone og dræn, en urban komponent til håndtering af bymæssige områder og HEC-RAS til modellering af kanaler og vandløb. Det overordnede princip i model-komplekset er vist på figur 6 nedenfor.



Figur 6: Skematisk fremstilling af model-komplekset.

Det er vores vurdering, at det ikke er nødvendigt med en decideret model for afløbssystemer for at beskrive tilledning fra bymæssig bebyggelse. I stedet kan der fjernes en del af nedbøren fra de befæstede områder og tilledes direkte til vandløbene.

4 Data. Kilder og behandling

Der ligger et betydeligt arbejde i indsamling, organisering og kvalitetssikring af data. Derfor er der lagt vægt på, at datagrundlaget effektivt kan anvendes til fremtidige analyser, hvor Rødby Fjord-modellen ikke nødvendigvis anvendes. Alle data er organiseret og dokumenteret og gemt i filer, som ikke forudsætter anvendelse af Rødby Fjord-modellerne eller kommercielle software systemer.

Endvidere er dele af datamaterialet gjort tilgængeligt som en web-applikation. Da data-materialet er meget stort, opfordrer vi folk med interesse i data til at bruge den side. Web-applikation giver mulighed for at zoome på de specifikke områder som har interesse.

Adressen på siden er: <http://hydroinform.dk/WebApps.html#/RodbyFjord>

4.1 Vandløb

Databehandlingen omfatter de 10 vandløb, som danner hovedstammen i Rødby Fjord modellen, Alle 10 vandløb er opmålt i perioden 1998-1999 af Hedeselskabet (Idag Orbicon). Der er opmålt 1135 tværsnit, den samlede vandløbslængde er 86 km og den gennemsnitlige afstand mellem opmålte tværsnit er 75 m. Vandløbene er stationeret med stigende stationering fra opstrøms til nedstrøms ende.

Vandløb	Længde [m]	Fra Station [m]	Til station [m]	Antal tværsnit	Version
3L	10,490	1,084	11,573	151	Opmålt af Hedeselskabet 1998
4L	5,656	1,841	7,497	73	Opmålt af Hedeselskabet 1999
5L	5,049	0	5,049	54	Opmålt af Hedeselskabet 1998
34L	12,377	0	12,377	176	Opmålt af Hedeselskabet 1998
35L	9,211	0	9,211	128	Opmålt af Hedeselskabet 1999
36L	8,666	115	8,781	118	Opmålt af Hedeselskabet 1999
37L	2,324	10	2,334	25	Opmålt af Hedeselskabet okt. 1998
38L	6,096	1,120	7,216	66	Opmålt af Hedeselskabet nov. 1998
39L	22,279	0	22,279	267	Opmålt af Hedeselskabet okt. 1998
40L	3,880	0	3,880	77	Opmålt af Hedeselskabet aug. 1999
SUM	86027			1,135	

Tabel 1. Oversigt over hovedvandløb.

Data fra vandløbsopmålingerne ligger i VASP systemet hos Lolland Kommune. Der er for hvert opmålt tværsnit angivet stationering, men der er ikke tilknyttet geografiske koordinater (f.eks. UTM koordinater).

4.1.1 Geo-referering

Det er nødvendigt i forhold til opsætning af den integrerede Rødby Fjord model, at alt er geo-refereret, altså at der er tilknyttet koordinater til alt.

Geo-refereringen af vandløbene er foretaget på følgende måde:

1. I GIS system (vi har anvendt QGIS) er ortofoto fra forår 2012, med stor opløsning anvendt som baggrundslag. Oven på dette er vandløbene digitaliseret.
2. Lolland Kommune har eksporteret VASP data fra de 10 vandløb fra binær VASP format til VASP tekst format (ASCII filer).
3. VASP tekst filerne er ved hjælp af et program konverteret til komma separerede tekst filer, som efterfølgende vises i Microsoft Excel. I denne fil identificeres alle punkter fra opmålingerne, som kan genfindes på luftfoto. Dette er typisk broindløb, spang, tilløb af åbent vandløb, styrt mv.
4. Stationeringerne (fra VASP filerne) til disse punkter indføres i tabellerne for de digitaliserede vandløb.
5. Ved hjælp af et program kan UTM koordinater til de opmålte tværsnit bestemmes ved at flette VASP filerne og filerne for de digitaliserede vandløb, således at der fremkommer en samlet fil, hvor alle punkter (både tværsnit og vandløbspunkter) har x y og z koordinater. I denne proces sker der en udjævning i forhold til stationeringer, idet den vandløbslængde der kan beregnes ud fra de digitaliserede punkter ikke stemmer nøjagtigt overens med de tilsvarende forskelle i stationeringer fra opmålingerne. Det er kontrolleret, at der ved denne udjævning kun sker mindre korrektioner. Typiske korrektioner på omkring 1 – 2 meter, dog i enkelte tilfælde op til 20- 30 m.
6. Det antages, at tværsnittene er tilnærmelsesvist opmålt vinkelret på vandløbets retning. Ud fra denne antagelse er UTM koordinater til alle målepunkter i tværsnittene beregnet.
7. Det endelige dataset eksporteres til 4 formater, som indeholder samme information:
 1. Kommasepareret tekst format. Direkte læsbart i f.eks. Notepad eller Excel
 2. ESRI GIS Shape fil format.
 3. KML format, som kan vises direkte i f.eks. Google Earth.
 4. SDF format, som er et tekstformat, der kan importeres direkte i HECRAS modellen.

4.1.2 Styrt

Der findes 9 styrt på de 10 udvalgte vandløb. Styrtens placering er vist på Figur 7 nedenfor.



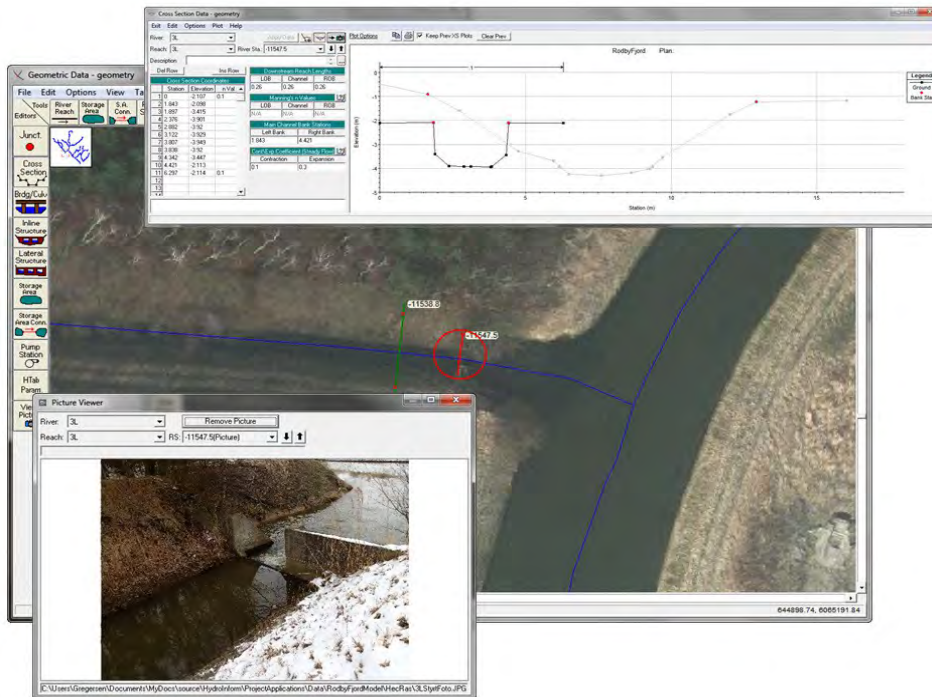
Figur 7: Placering af styrt markeret med gule firkanter.

Oversigt over styrtene med angivelse af styrtets højde og overløbskote er vist i tabel 2 nedenfor.

Vandløb	Station [m]	Styrt højde [m]	UTMX [m]	UTMY [m]	Overløbskote [m]
3L	11,548	1.13	644,929	6,065,166	-3.949
4L	7,473	0.9	647,584	6,067,307	-3.539
34L	7,041		651,258	6,067,836	-0.285
34L	7,374		650,948	6,067,791	-0.917
34L	9,435	0.61	648,983	6,067,690	-2.1
34L	10,199	1.21	648,225	6,067,765	-3.339
36L	8,758	0.74	650,220	6,063,969	-3.614
40L	3,213	0.45	652,737	6,062,799	-1.149
40L	3,867	1.12	652,214	6,063,139	

Tabel 2. Placering af styrt.

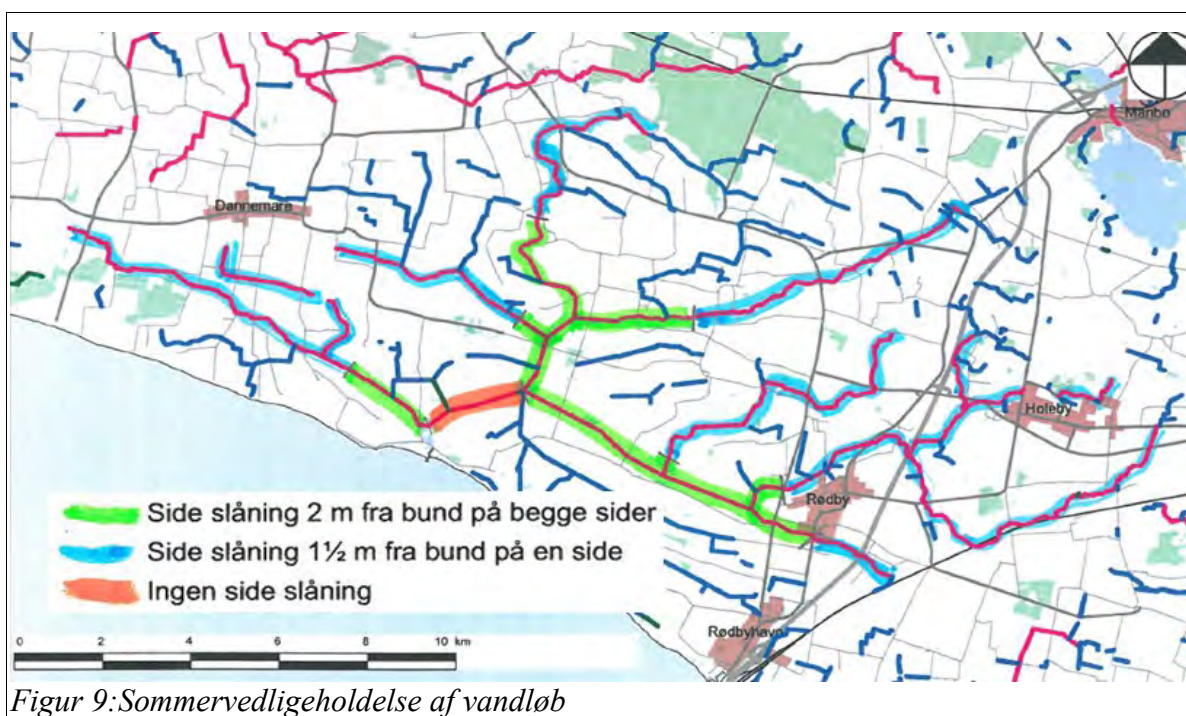
Styrtenes geometri er opmålt sammen med vandløbene og dermed indeholdt i alle vandløbsfilerne. På Figur 8 er vist geometrien for styrt på vandløb 3L st. 11548, som det ses i HECRAS modellen.



Figur 8: Eksempel på visning af styrt på vandløb 3L, st. 11548 i HECRAS modellen.

4.1.3 Grødeskæring

For nuværende foretages der sommervedligeholdelse i perioden 15. juni til 15. august samt efterårsvedligeholdelse efter høst. Efterårsvedligeholdelsen omfatter alle vandløb, og både bund og sideskråninger klippes. Ved sommervedligeholdelsen skæres bundvegetationen i de vandløb, som er markeret med farve på figur 9 nedenfor. I vandløb, som på figuren er markeret med grøn, slås sideskråninger på de nederste 2 meter, for vandløb markeret med blå slås sideskråninger på den nederste halvanden meter på den ene side, mens der i vandløbet markeret med rødt ikke foretages slåning af sideskråninger.



Figur 9: Sommervedligeholdelse af vandløb

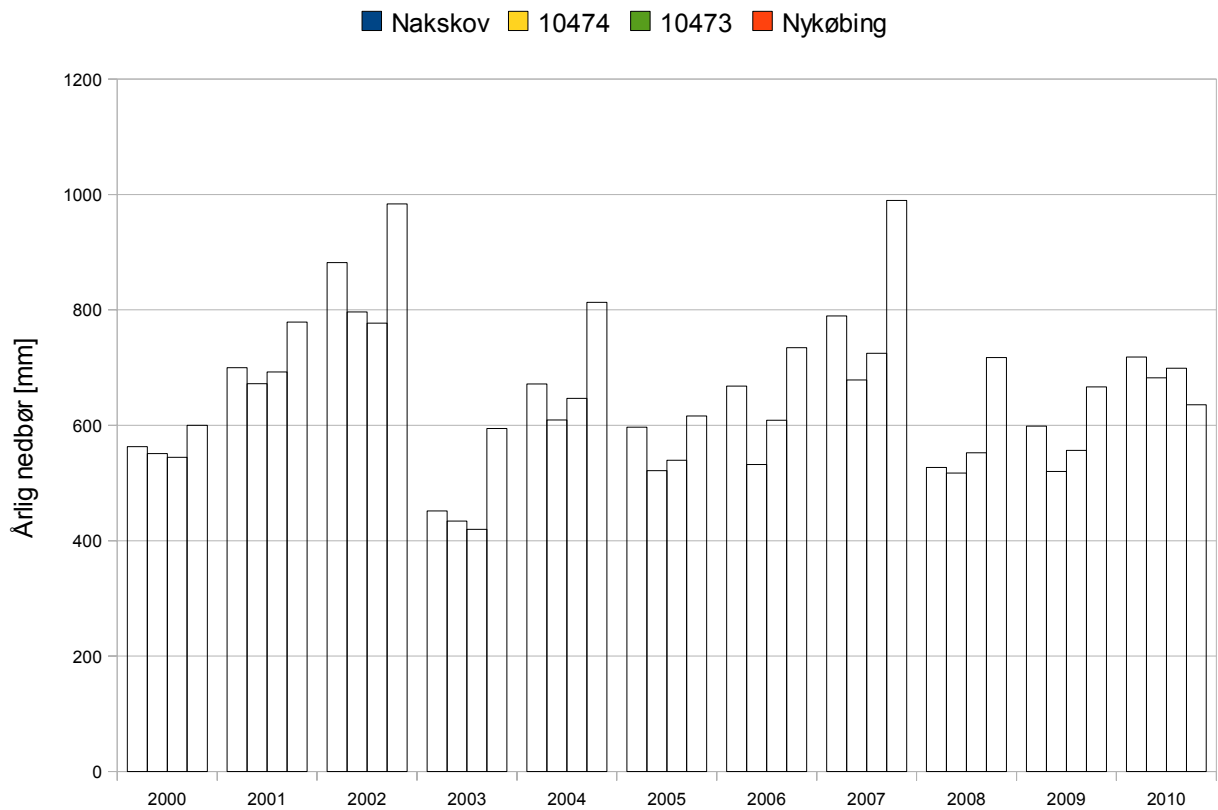
4.2 Klima

De nødvendige klimadata til modelleringen er nedbør, gennemsnitlig daglig temperatur og gennemsnitlig daglig globalindstråling. De sidste to datatyper skal benyttes til at beregne den potentielle fordampning ved hjælp af Makkinks metode, som er metoden, der blandt andet anbefales af Plauborg et al. (2002) og er benyttet i DK-modellen (Højberg et al. 2010). Der skal benyttes både historiske data og data for fremtidigt klima. For de historiske data er den primære kilde DMI's klimagrid (DMI 2012). I klimagridet har DMI lavet et landsdækkende net, hvor de har interpoleret værdier fra alle forhåndenværende kilder. På oplandsskala vurderes det at være den mest repræsentative data-kilde. For nedbør er opløsningen 10x10 km og for temperatur og globalindstråling er den 20x20 km.

For de fremtidige data er det nødvendigt at benytte data fra klimamodeller. GEUS har i flere studier forsøgt at fremskrive klimaet med henblik på at foretage hydrologiske simuleringer. I Henriksen et al. (2013) havde de adgang til data fra ni forskellige klimamodeller, hvoraf de udvalgte tre til at repræsentere henholdsvis et vådt, tørt og et median fremtidigt klima. Disse tidsserier (nedbør, temperatur og fordampning) med 100 års data på daglig tidsskridt danner grundlaget for simuleringer med fremtidigt klima.

4.2.1 Nedbør

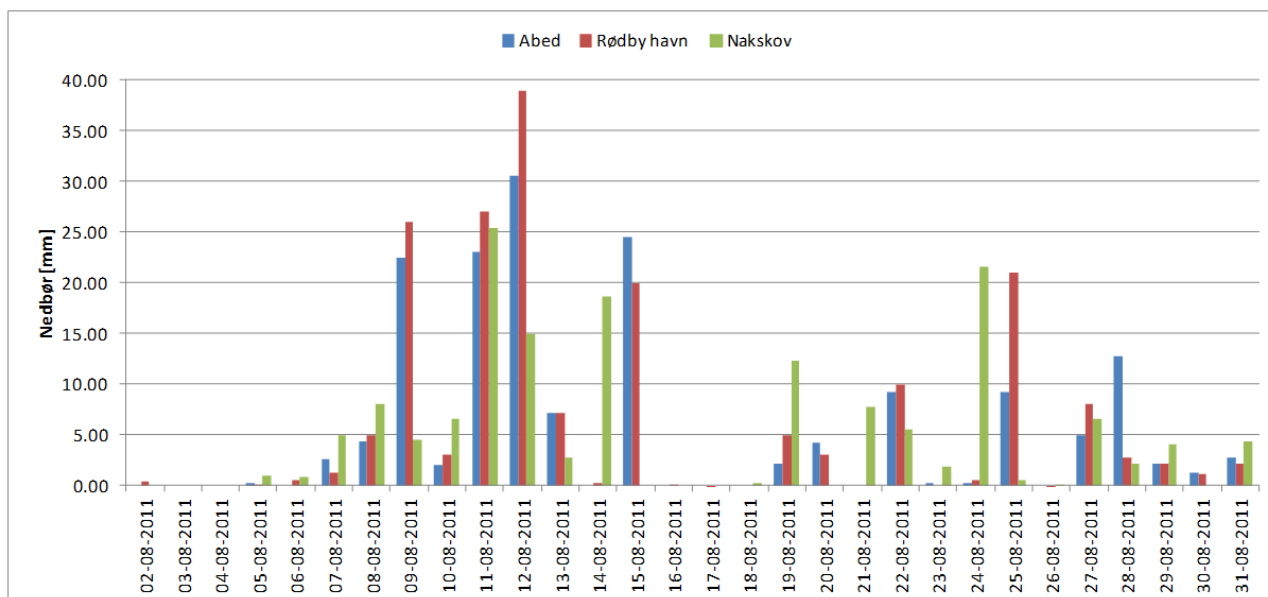
Ud over klimagridet har vi adgang til nedbørsmålinger fra svk-målerne ved Nakskov renseanlæg og Nykøbing renseanlæg samt den nye online-måler ved Kramnitse. På figur 10 er den årlige nedbør fra de to relevante celler i klimagridet sammenlignet med nedbøren fra svk-måleren i Nakskov og Nykøbing.



Figur 10: Årlig nedbør fra SVK-målerne i Nakskov og Nykøbing og fra to klimagrid-celler i oplandet.

Nedbøren i Nakskov og Nykøbing er konsekvent højere end nedbørsdata fra klimagridet.

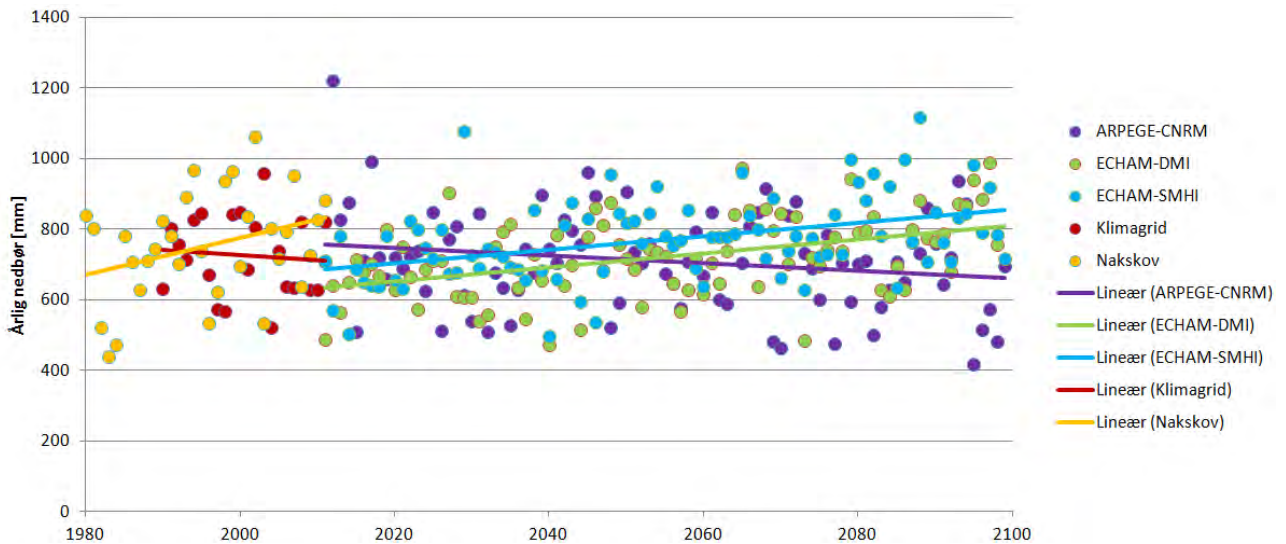
For juni til september 2011 har vi endvidere adgang til data fra DMI's målere i Abed, Rødbyhavn og Nakskov. På Figur 11 har vi sammenlignet nedbøren fra de tre stationer for august 2011.



Figur 11: Nedbør målt i DMI's målere Abed, Rødbyhavn og Nakskov for august 2011.

På trods af den lille afstand i mellem de tre stationer kan der observeres relativt store udsving i den målte nedbør. Eksempelvis den 9. august hvor der kun faldt 4.5 mm i Nakskov mod 22 og 24 mm i henholdsvis Abed og Rødbyhavn. Det er typisk for den slags sommerregn, at der kan være meget store lokale udsving. Summeres nedbørsmængden for hele perioden juni til september for de tre måneder fås 428, 435 og 449 mm for henholdsvis Abed, Rødbyhavn og Nakskov, og her ses altså ikke den store forskel. Ud fra vores forventninger om magasinering og tidsskala for oplandet forventer vi ikke, at de lokale forskelle vil få stor betydning for den samlede afstrømning. En lokal tordenbyge vil naturligvis kunne skabe en oversvømmelse i byområder, men næppe isoleret set i landområderne.

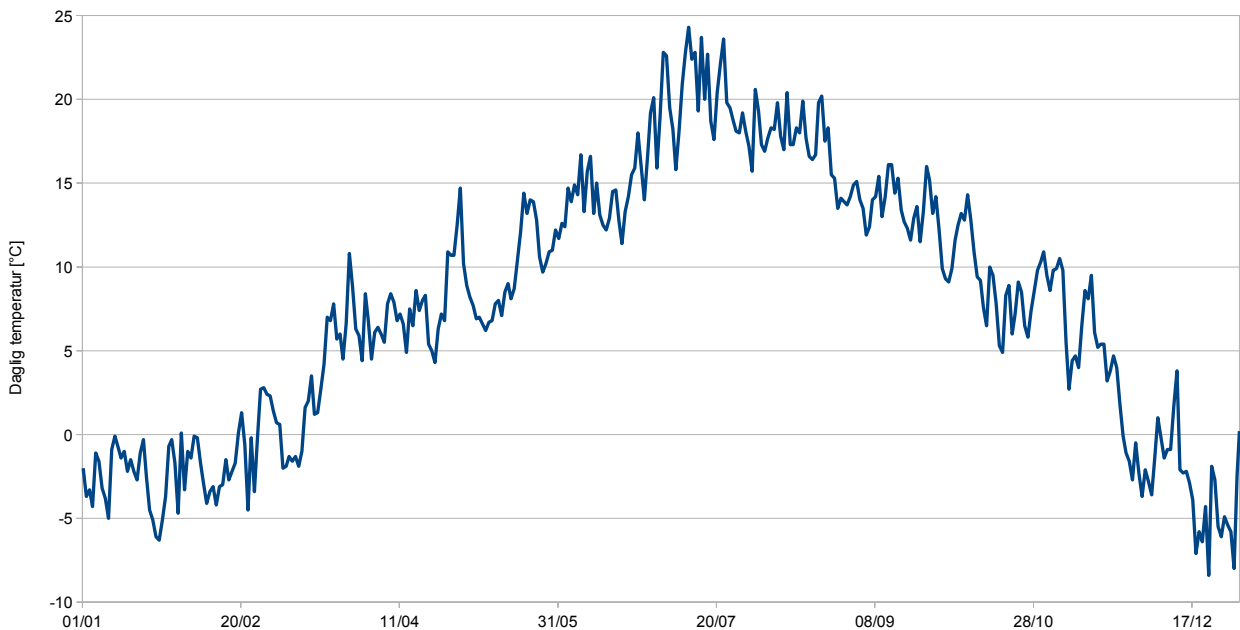
På figur 12 er den årlige nedbør for de historiske og de fremtidige data sammenlignet. De rette linjer er tendenslinjer, og det bemærkes, at de ikke er entydige. To af modeller forudsiger stigende nedbør i fremtiden, mens den sidste model viser et svagt fald i middelnedbør. Det skal med det samme siges, at middelnedbøren ikke kan bruges som indikator for oversvømmelser, da disse bliver bestemt af nedbørsmønstre.



Figur 12: Årlig nedbør i nuværende og fremtidigt klima.

4.2.2 Temperatur

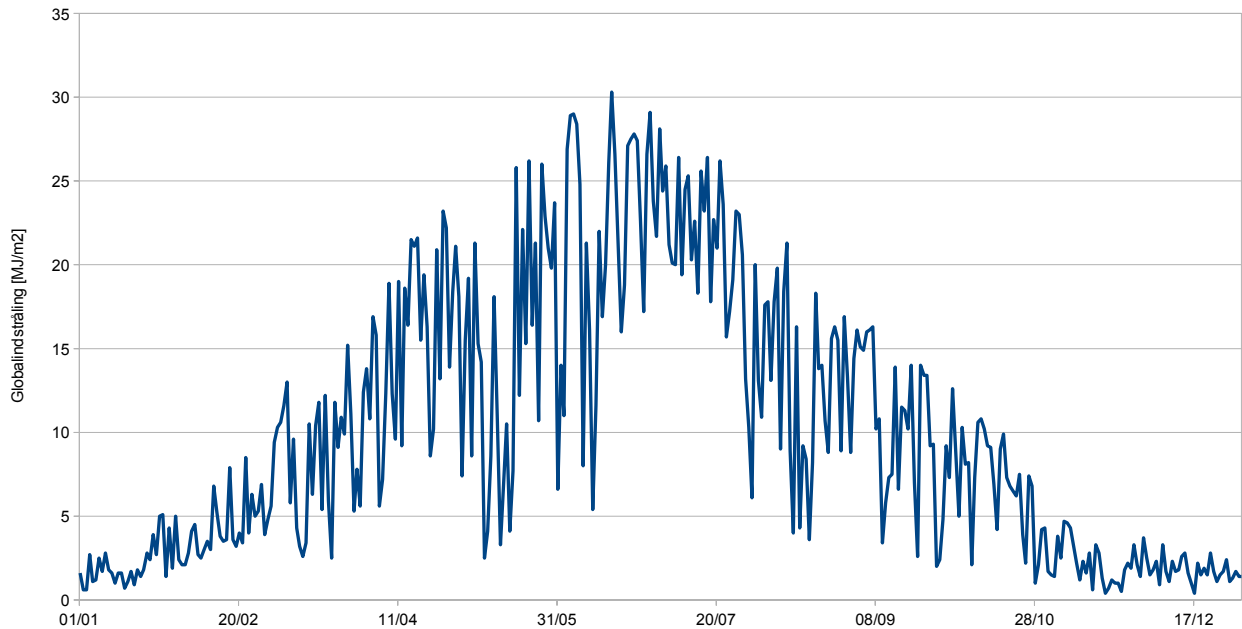
Temperaturen er hentet fra DMIs klimagrid (DMI 2012). For perioden efter 2010 har vi adgang til online-temperaturdata fra en målestation på Sydsjælland. Temperaturen indgår i beregningen af fordampning. Den arealmæssige variation af temperaturen har ikke stor indflydelse på den beregnede fordampning. Figur 13 viser den daglige temperatur for 2010.



Figur 13: Daglig temperatur for 2010.

4.2.3 Indstråling

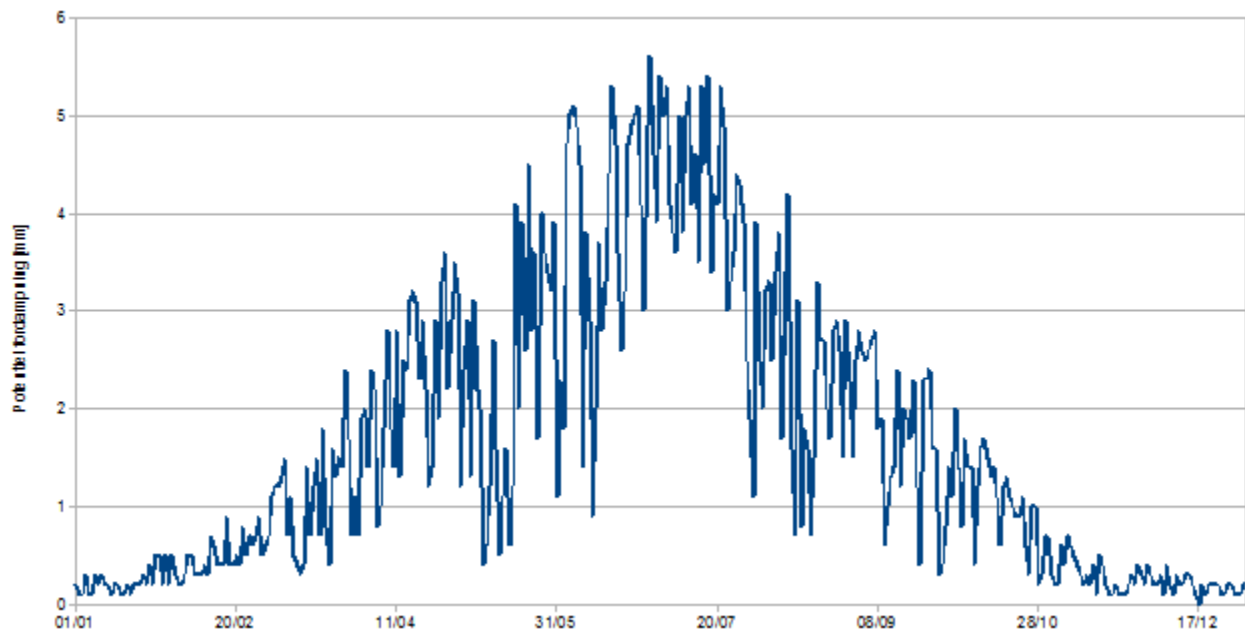
Globalindstrålingen skal som temperaturen benyttes til beregning af fordampningen, og den hentes også fra DMI's klimagrid. For perioden efter 2010 har vi hentet globalindstråling fra en målestation ved Sydfalster Varmeværk. Figur 14 viser de daglige værdier for 2010, og det ses, hvordan indstrålingen er højere om sommeren og lavere om vinteren. I forhold til temperaturen er maksimum en anelse forskudt, da den i højere grad er bestemt af dagens længde.



Figur 14: Daglig globalindstråling for 2010.

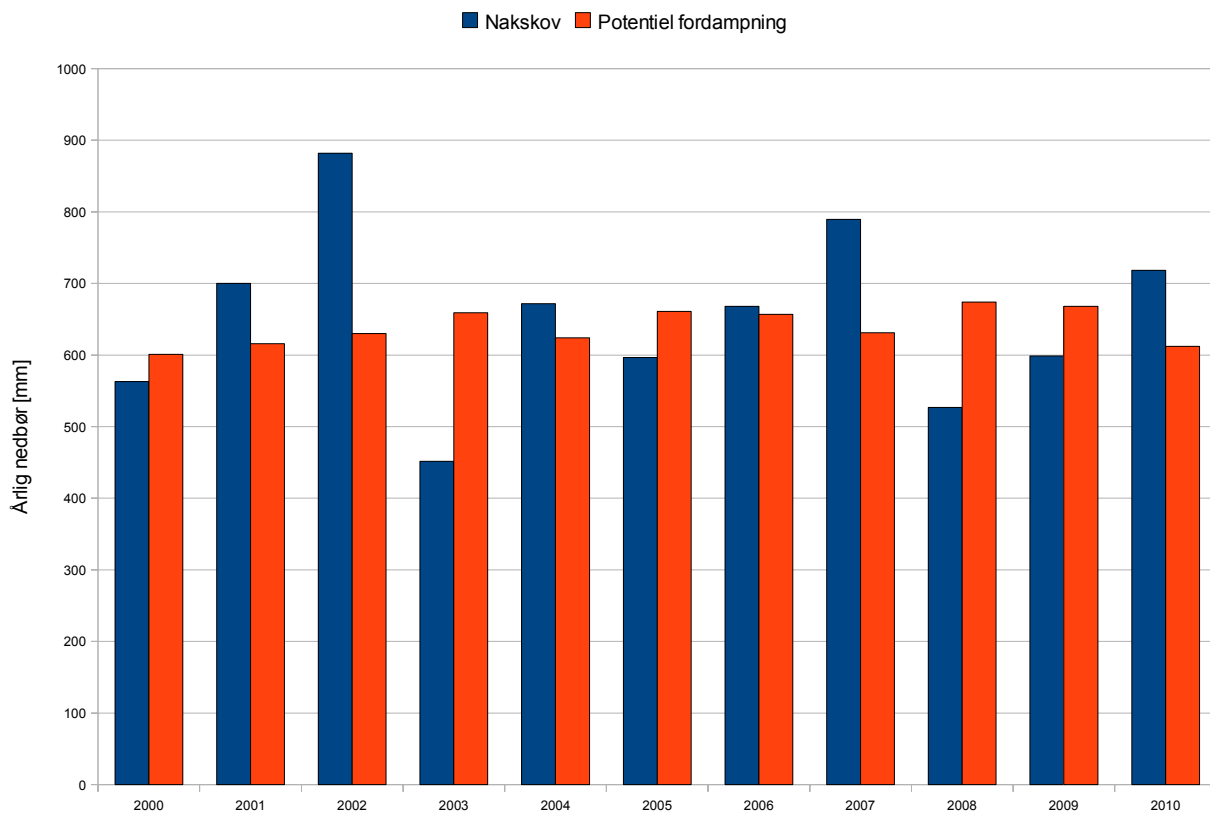
4.2.4 Potentiel fordampning

Potentiel fordampning indgår ikke som en parameter i modellen, men i klima-griddet (DMI 2012) er den beregnet på samme måde, som den bliver beregnet i dette studie. Figur 15 viser den daglige potentielle fordampning for 2010, og som temperaturen og indstrålingen er den højest om sommeren.



Figur 15: Daglig potentiel fordampning for 2010

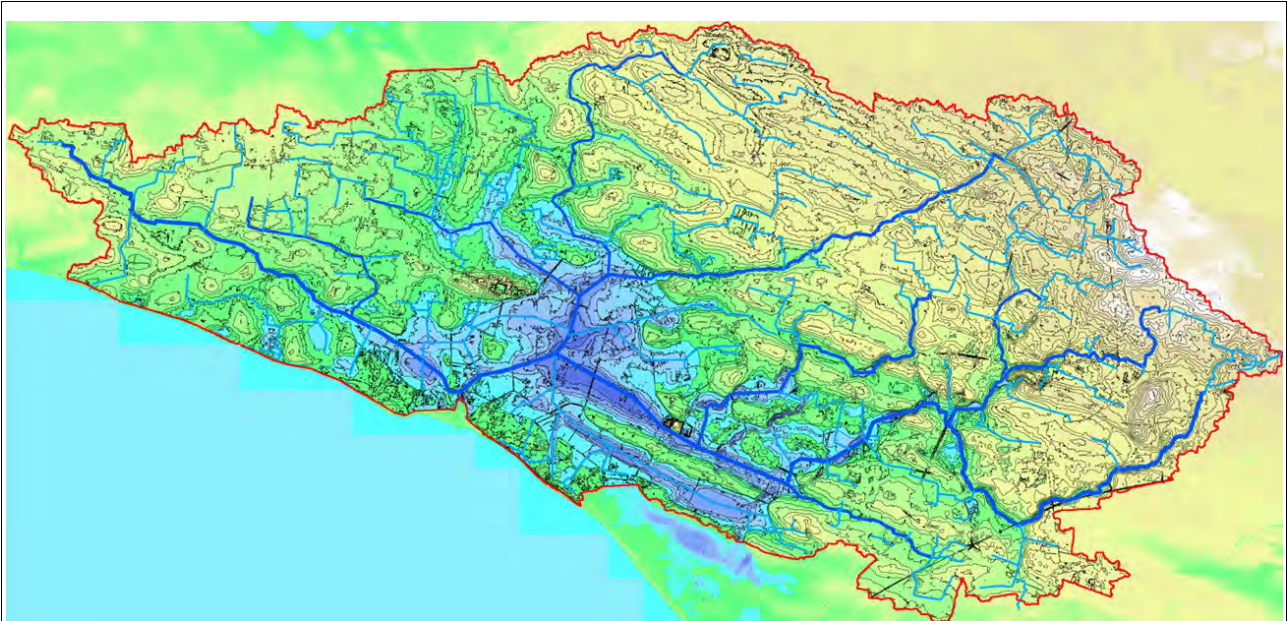
På Figur 16 nedenfor sammenlignes den årlige fordampning med nedbøren fra svk-måleren ved Nakskov renselanlæg. Den potentielle fordampning ses at have mindre udsving end nedbøren, og ligger nogenlunde konstant omkring en middelværdi på 640 mm pr. år. De begrænsede udsving i forhold til nedbøren viser, at temperatur og globalindstråling ikke er kritiske inputparametre for modellen i og med, at de ikke vil påvirke vandbalancen, så meget som nedbøren.



Figur 16: Årlig potentiel fordampning sammenlignet med årlig nedbør.

4.3 Højdemodel

I projektet anvendes den digitale højdemodel (DHM), som frit kan downloades fra Geodatastyrelsens downloadside: <http://kortforsyningen.dk/>. Højdemodellen findes i en opløsninger med gridstørrelser på 1,6 m og 10 m.



Figur 17: Topografisk kort baseret på den digitale højdemodel med 1m højdekurver. Blå markerer området med terrænkoter under nul.

Højdemodellen har været anvendt til at udvide tværsnittene (1,6 m modellen) og til at bestemme deloplandene til vandløbene (10 m modellen). Der er bestemt topografiske oplande for stort alle tværsnit i vandløbsmodellen ved hjælp af programmet Taudem.

(<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>).

Vi indlagt enkelte rørlagte vandløb og Mellemnorskanalen, som løb på tværs af ellers beregnede oplandsgrænser, samt udløbene ved Kramnitse, Bredfjed og Maglehøj. Disse ændringer er foretaget ved at lave en kunstig sænkning af visse områder i højdemodellen.

Placeringen af vandløbene og tværsnittene ses i figur 18.



Figur 18: Korrektion i højdemodel. De sorte linjer markerer andre rørlagte og åbne vandløb, der er lagt ind.

Herefter har vi kunnet bestemme oplandet for et hvilket som helst punkt i vandløbene. Efterfølgende er oplande med arealer mindre en 5 ha sorteret fra, og de resterende er gemt i databasen, hvor de danner udgangspunktet for fordelingen af indstrømning langs vandløbet. I alt giver det 381 deloplande. Oplandene er vist på figur 19, og det bemærkes, hvordan der er fint diskretiseret langs vandløbet, mens oplandene bliver større mellem hovedvandløbene.



Figur 19: Oplandsgrænser vist med sort.

4.4 Arealanvendelse

Arealanvendelsen er afgørende for, hvordan nedbøren fordeles på fordampning, nedsivning og magasinering. Fra et befæstet areal løber nedbøren af som afstrømning med det samme. Fra en dyrket mark er fordampningen og dræningen anderledes end fra et skovområde.

På basis af forskellige data-kilder har vi sammenstykket et GIS-tema, der dækker hele oplandet. Fra NaturErhvervstyrelsen har vi hentet et landsdækkende tema med markdata. Temaet er baseret på indmeldingerne fra landmændene for at modtage arealstøtte, og det indeholder polygoner med marker og afgrøder for 2012. Det har vi kombineret med FOT-data fra GeodataStyrelsen, hvorfra vi har benyttet temaerne med bebyggelse, søer og skov. En del af disse elementer overlapper, og der har vi prioriteret dem ud fra denne rækkefølge:

1. Mark
2. Sø
3. Skov
4. By

Det sikrer, at skovområder i byer forbliver skov, søer i skove forbliver sø, og at alle marker er med, selv om arealet er karakteriseret anderledes. Figur 20 viser fordelingen geografisk, og det ses, hvordan oplandet hovedsageligt er domineret af opdyrket land.



Figur 20: Arealanvendelse i oplandet. Lysegrøn er marker, mørkegrøn er skov og grå er bebyggelse.

I nedenstående tabel er arealerne for de enkelte kategorier angivet.

Anvendelse	Areal [ha]
Marker	16301
Befæstet areal	1042
Skov	1181
Søer	39
Samlet areal for opland	20447

Tabel 3. Fordeling af arealanvendelsen.

Af markarealet udgør vinterhvede/byg 35%, vårbyg 28% og roer 23 %.

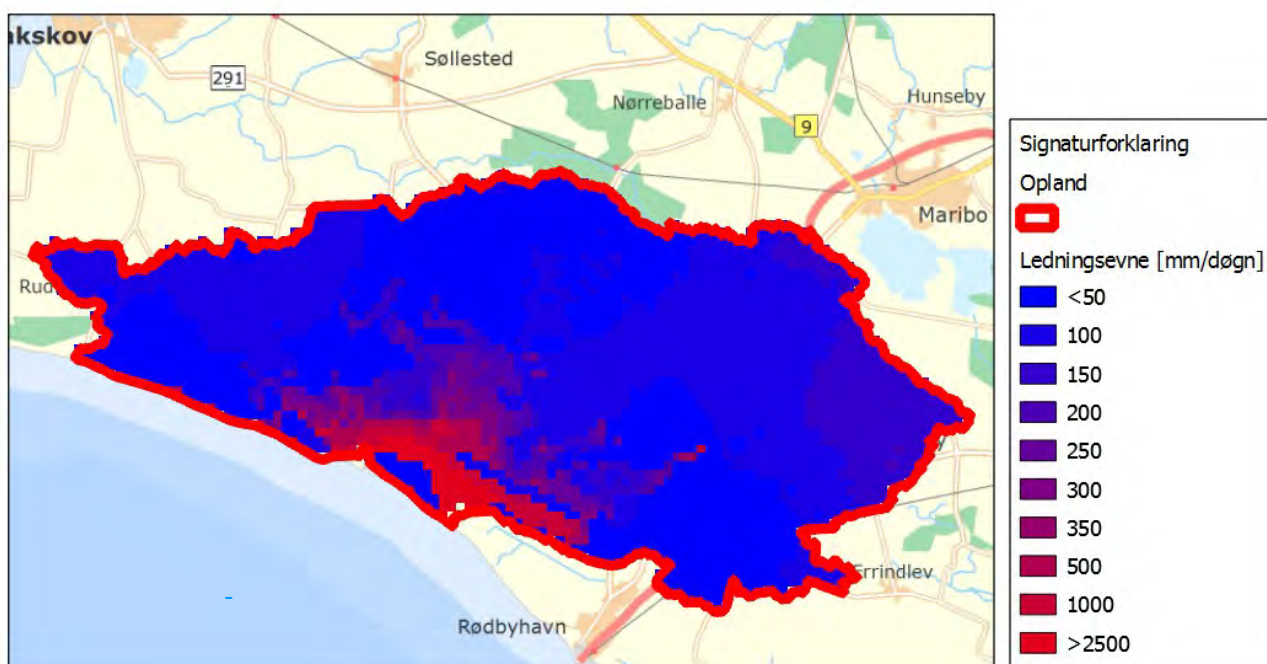
Der er enkelte huller i datasættet for arealanvendelsen, hvoraf flyvepladsen ved Holeby, vådområdet ved Hummingen og enkelte marker kan identificeres direkte ved zoom-niveauet på Figur 20. Dertil kommer veje og kanaler, og alt i alt er ca 5 % af oplandets areal ikke dækket. Det får dog ikke den store betydning, idet vi blot benytter fordelingen inden for et givent opland til at parametrisere forskellige Daisy-kolonner. 5% huller giver altså ikke 5 % fejl.

4.4.1 Jordtyper

De øverste jordlag er domineret af moræneler uden for den gamle fjord og mere sandede marine aflejringer i den gamle fjord.

NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG (DCA) ved Århus universitet har udarbejdet et landsdækkende kort over den mættede hydrauliske ledningsevne for de øverste 25 cm i 20 m-opløsning. Kortet er baseret på et jordbundskort, som beskriver indholdet af ler, silt, finsand, grovsand samt organisk stof i de øverste 25 cm, som derefter er omregnet til ledningsevne ved hjælp af nogle pedotransfer-funktion, som igen er fundet ud fra en lang række målinger af hydraulisk ledningsevne (Iversen et al. 2009).

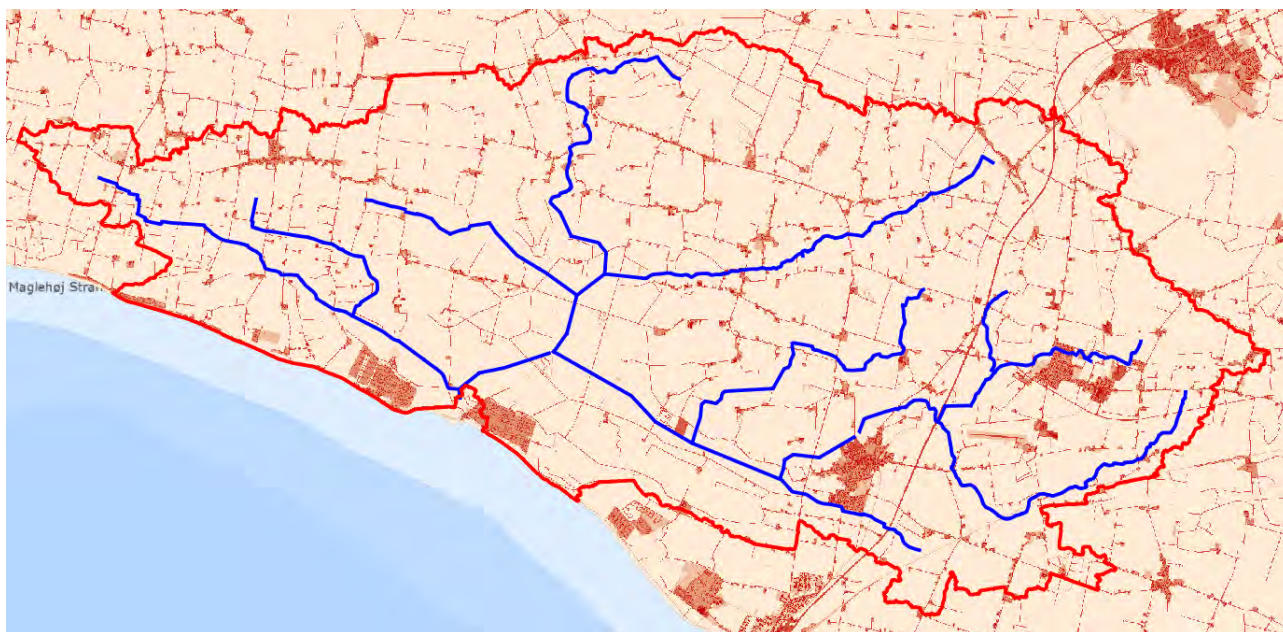
Data er hentet fra GeoDataStyrelsens hjemmeside. På Figur 21 har vi udtrukket værdier for oplandet, og den gamle fjord kan tydeligt erkendes som områder med højere ledningsevne.



Figur 21: Hydraulisk ledningsevne i de øverste 25 cm.

4.4.2 Befæstelsesgrad

Naturstyrelsen har udarbejdet et landsdækkende kort for befæstelsesgraden i 10 m-opløsning, hvoraf et udsnit ses på Figur 22. Kortet er hentet fra GeoDataStyrelsens hjemmeside. Man kan tydeligt se byområderne og vejene.

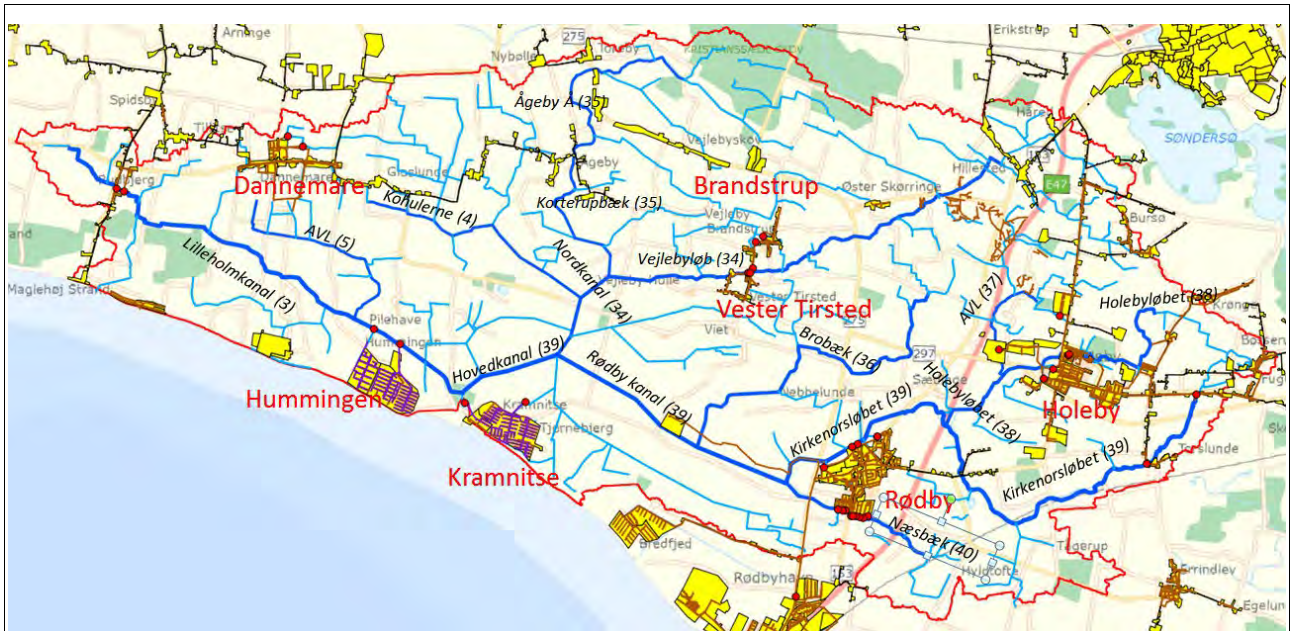


Figur 22: Befæstelsesgrad i oplandet. Mørkere rød angiver højere befæstelsesgrad.

4.4.3 Bymæssig tilledning

Afledning af regnvand fra byområder og befæstede arealer kan bidrage til øget risiko for oversvømmelser. Navnlig situationer med korte intense nedbørshændelser kan give kritiske situationer.

Hovedledninger, regnvandsledninger, udløbspunkter og oplande er vist på Figur 23 nedenfor.



Figur 23: Områder med bymæssig bebyggelse og/eller befæstede områder (gult), fællesledninger med udløb/overløb til vandløbene (brun), regnvandsledninger (lilla), og udløbspunkter (røde punkter).

Oplandsarealer og udløbspunkternes stationering og vandløb er listet i tabel 4 nedenfor.

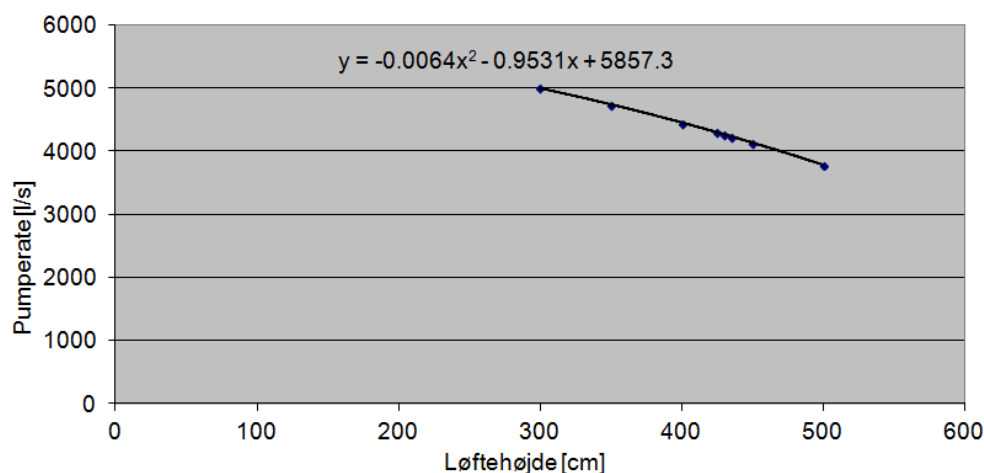
Område	Areal [ha]	Vandløb	Udløb fra st. [m]	Udløb til st. [m]
Rødby	134	Kirkenordsløbet (39L)	11490	12640
Rødby	26	Næsbæk (40L)	1805	2525
Holeby	227	Holebyløbet (38L)	3490	4290
Holeby	20	avl 37L (37L)	1604	1604
Holeby	27	Kirkenordsløbet (39L)	0	0
Holeby	12	Kirkenordsløbet (39L)	2175	2175
Brandstrup / Vester Tirsted	36	Vejlebyløb (34L)	6913	6945
Dannemare	54	Kohulerne (4L)	3427	3427
Hummingen	126	Lilleholmkanal (3L)	9046	9674
Kramnitse	102	Mellemnorskanal (22)		

Tabel 4. Byområder, estimerede oplandsarealer og tilløbspunkter.

4.5 Udpumpning/afstrømning

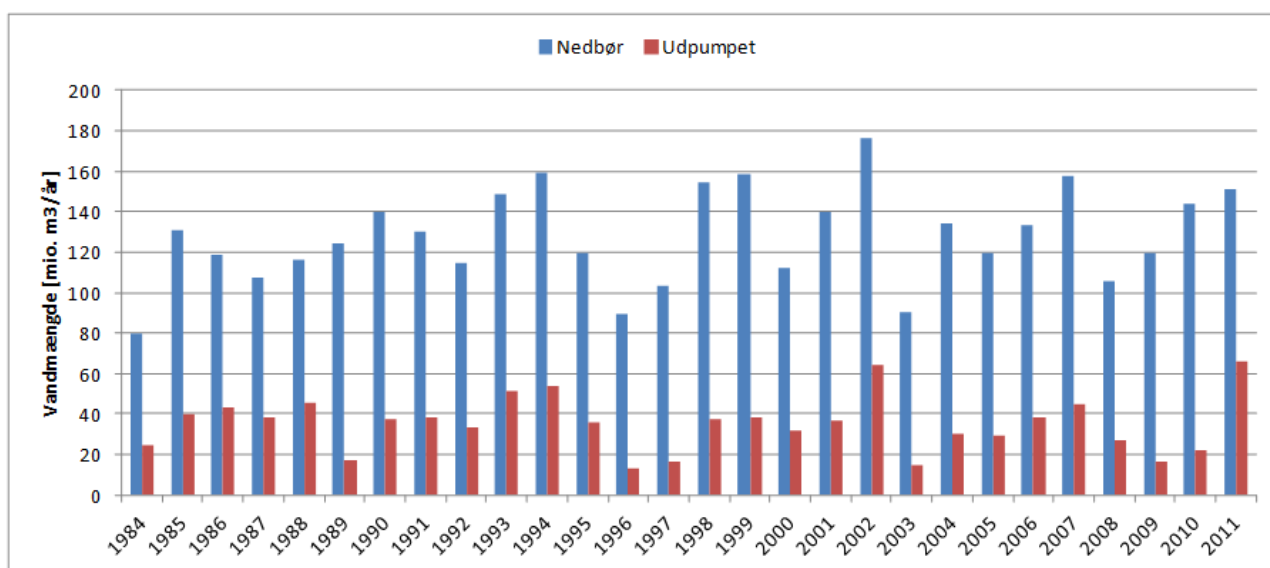
Fra DCE har vi fået udleveret en historisk tidsserie for udpumpningen ved Kramnitse i perioden

1984 til 2011, begge inklusiv. Udpumpningen er beregnet af Naturstyrelsen ud fra vandstanden i kanalen og vandstanden i udpumpningsbassinet, hvilket giver løftehøjden. Det er kombineret med pumpekaraktistikken (se figur 24) og en tidsserie for pumpetimerne, og det samlede resultat bliver en tidsserie med udpumpet mængde pr. døgn. Fra maj 2013 har vi modtaget real-time data fra Kramnitse og har selv beregnet udpumpningen på tilsvarende vis.



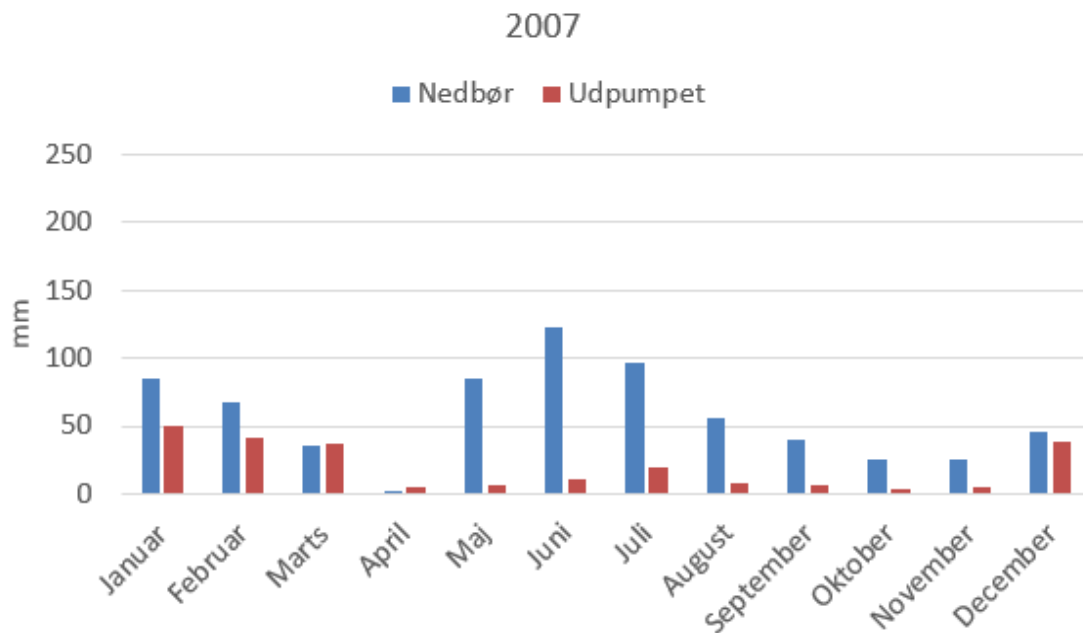
Figur 24: Pumpekaraktistik for en enkelt pumpe ved Kramnitse.

I nedenstående figur har vi opsummeret udpumpningen til årsværdier, og sammenlignet med årsværdier for nedbøren ved SVK-måleren i Nakskov multipliceret med oplandets areal.

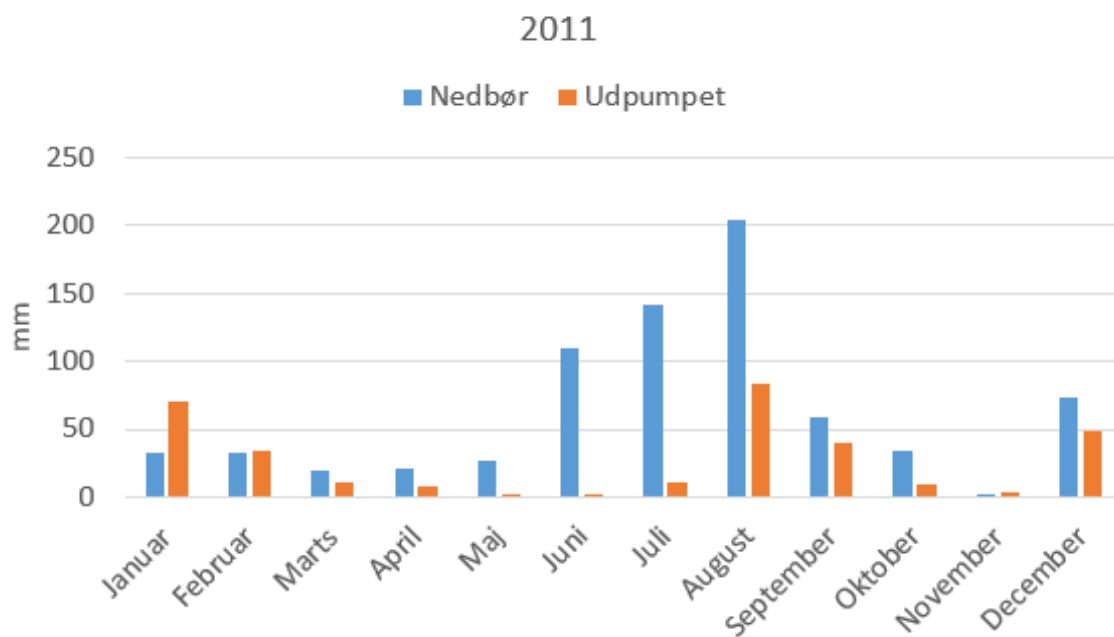


Figur 25: Årlig udpumpet mængde sammenlignet med nedbøren fra Nakskov.

Det bemærkes, at det i gennemsnit kun er ca. 30 % af nedbøren der udpumpes. Endvidere er der stor forskel på, hvor meget der udpumpes de enkelte år. I 2011 udpumpes der eksempelvis 30 % mere end i 2007 til trods for, at nedbøren var større i 2007. Ved at zoome ned på månedsniveau for de to år, kan vi finde en del af forklaringen.



Figur 26: Månedsværdier for udpumpning og nedbør 2007.

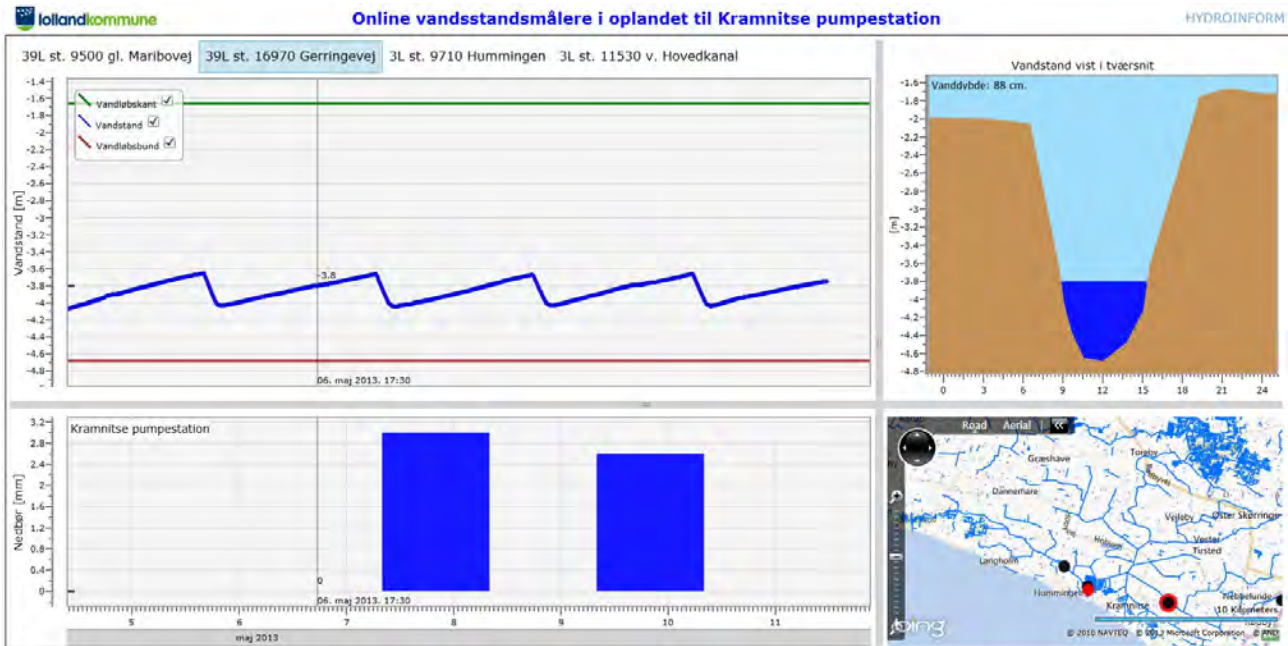


Figur 27: Månedsværdier for udpumpning og nedbør 2011.

I januar 2011 blev der udpumpet mere, end der faldt som nedbør, og det må således være nedbør akkumuleret som sne fra året før. Endvidere er der i 2011 stor udpumpning i august og september mod stort set ingenting i 2007. Generelt er nedbøren mere jævnt fordelt i 2007 og det giver anledning til mindre afstrømning end i 2010, hvor der faldt meget store mængder i en kort periode om sommeren. Disse indledende betragtninger viser lidt om, hvor vigtig magasineringen er i systemet.

4.6 Vandstandsloggere

Der foreligger ikke egentlige vandstandsmålinger fra oplandet, men i forbindelse med projektet er der blevet opsat fire automatiske vandstandsloggere. Deres placering og data kan følges online her: <http://HydroInform.dk/Lolland.html>. Disse data er anvendt i forbindelse med kalibreringen af modellen. Figur 28 viser et skærbillede fra siden, hvor vandstanden ved måleren i Rødbykanalen er vist. Det ses, hvordan vandstanden bevæger sig nærmest lineært op og ned, hvilket skyldes udpumpningen ved pumpestationen 5 km nedstrøms.



Figur 28: Skærbillede fra hjemmesiden med data fra vandstandsloggerne.

4.7 Observationer fra oversvømmelser

Ud fra flyfotos samt erfaringer og almindelige visuelle observationer fra Landvindingslauget og Lolland Kommune er der konstrueret kort over områder med blankt vand ved typisk tøbrudssituation, ved tøbrud i 2010 og ved oversvømmelsen i august 2011. Disse er vist på Figur 29, Figur 30 og Figur 31 nedenfor. Det skal bemærkes, at disse kort ikke kan betegnes som dækkende, idet de primært afspejler de områder der er blevet overfløjet. Der har derfor helt sikkert været oversvømmelse andre steder i området, som ikke er indtegnet på disse kort.



Figur 29: Observerede områder med blankt vand ved typisk tøbrud.



Figur 30: Områder med blankt vand observeret ved tøbrud år 2010.



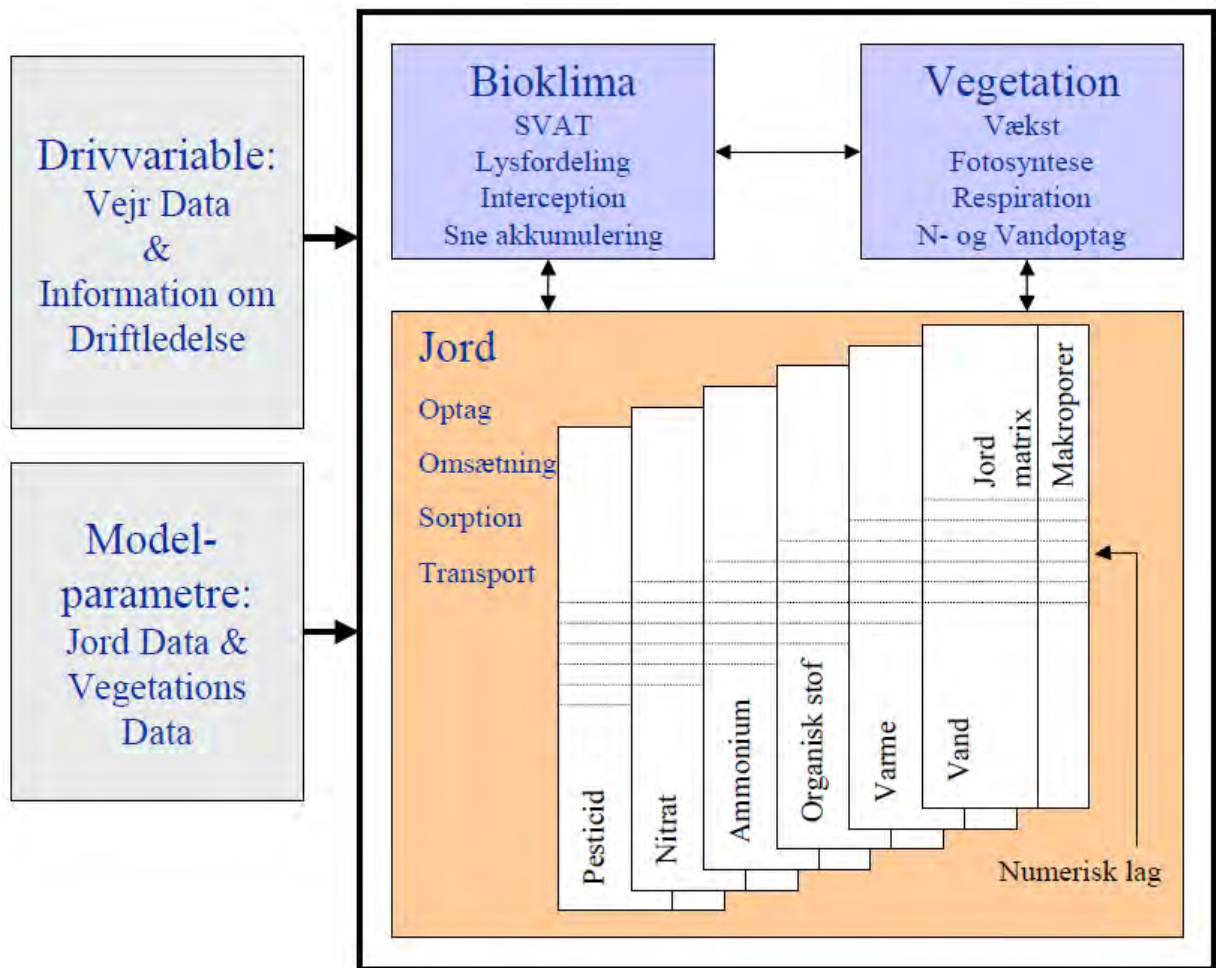
Figur 31: Områder med blankt vand observeret ved langvarig nedbørshændelse i august 2011.

5 Model. Opstilling, kalibrering, test

I dette kapitel dokumenteres opstillingen af modellerne. Datagrundlaget giver efter vores vurdering ikke mulighed for at lave en stringent kalibrering, validering og sensitivitetsanalyse af modellen, som det ofte anbefales. I stedet har vi kalibreret del-elementer, hvor det har været muligt, og derefter anvendt alle tilgængeligt data til at teste modellerne med. I disse test har vi udført elementer af både kalibrering, validering og sensitivitetsanalyse. Hensigten med testene er at sikre, at der ikke er begået fejl i opstillingen af modellerne, og at opbygge tillid til modellerne ved at vise, at de både kan simulere det vi ser ske og det vi forventer vil ske.

5.1 Daisy

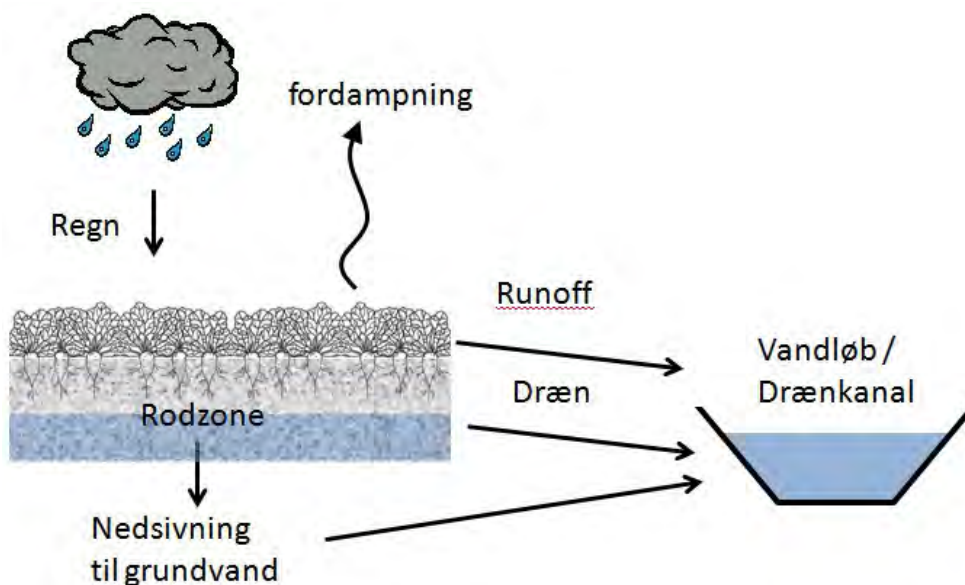
Daisy-modellen er en fysisk-baseret, 1-dimensionel model, der beskriver plantevækst og vandstrømning i rodzonen. Nedenstående figur viser en fremstilling af modellens vigtigste elementer.



Figur 32: Skematisk præsentation af Daisy-modellen. Figur fra Styczen et al. 2006.

Modellen er her opdelt i en bioklimatisk del, en vegetationsdel og en jorddel. Endvidere ses i venstre side de parametre og variable, modellen skal tilpasses med. I dette projekt er modellens funktion at fordele nedbøren på fordampning, afstrømning og magasinering. Det kræver, at den både kan beskrive vegetationen og magasineringen i jorden tilfredsstillende.

Figur 33 viser, hvordan nedbøren i en Daisy-kolonne kan fordeles mellem fordampning, magasinering, drænaforstrømning, nedsivning til grundvand og overfladisk afstrømning. De tre sidste summeres og tildeles vandløbsmodellen.



Figur 33: Fordeling af nedbør i Daisy og kobling til vandløbsmodel.

Eftersom modellen er 1-dimensionel, kan den ikke beskrive forhold, der varierer areal-mæssigt. Derfor opstilles kolonner for alle de variationer, der ønskes modelleret. Opstilling af modellen består derfor i at udvælge de nødvendige kolonner og derefter parametrisere disse.

5.1.1 Opstilling

Modellen er i videst muligt omfang opstillet som anbefalet i Styczen et al. (2006).

Jorden i området er generelt meget leret, dog er der områder i den tidligere fjord, som er af mere sandet karakter. Det giver anledning til en opdeling i to jordtyper. Til lerkolonnerne vælges jordtypen JB7, og til sandkolonnerne vælges jordtypen JB5 fra Styczen et al. (2006).

Hele området er drænet og terrænet er relativt fladt, så der benyttes dræn som nedre rand i hele området. Drændybden sættes til 120 cm og afstanden mellem dræne sættes til 14 m i lerjorden og 20 m i sandjorden.

Afgrødefordelingen er fra 2012, og vi antager, at den er repræsentativ for hele perioden. Variationen i afgrøde modelleres ved hjælp af et 9-årigt afgrødeskifte, hvor der roteres mellem vinterhvede, vårbyg og roer, som i nedenstående tabel.

År	Afgrøde
1	Vinterhvede
2	Roer
3	Vårbyg
4	Vinterhvede
5	Vårbyg
6	Vinterhvede
7	Roer
8	Vårbyg
9	Vinterhvede

For at der ikke dyrkes den samme afgrøde i hele oplandet de enkelte år, opstilles 9 kolonner, som starter forskudt på rotationerne, hvorved der opnås nogenlunde den samme afgrødefordeling som i 2012.

Skovområdet modelleres med en selvstændig kolonne, idet fordampningen fra en skov er markant anderledes end fra en dyrket mark. De bebyggede områder modelleres ligeledes med en selvstændig kolonne, idet der i disse områder også skal være mulighed for et fjerne vand på grund af de befæstede arealer.

Parametriseringen af vegetationen og dyrkningspraksis hentes fra anbefalingerne i Styczen et al. (2006)

De klimatiske data giver ikke anledning til yderligere opdeling i selvstændige områder.

Alt i alt giver det 9 kolonner i lerjord, 9 kolonner i sandjord, 1 skovkolonne og en 1 kolonne til at repræsentere de bebyggede områder.

5.1.2 Kalibrering

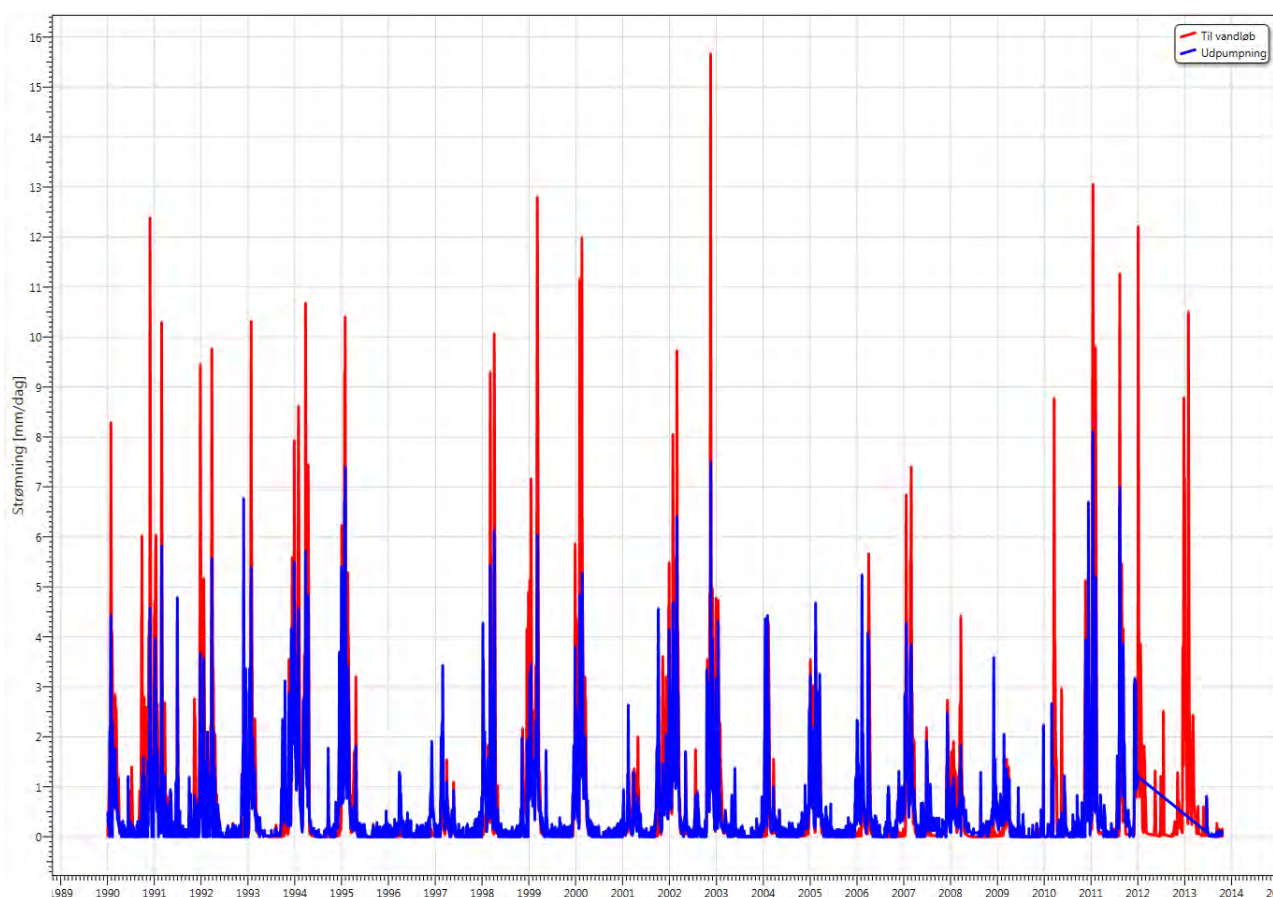
Daisy-kolonnerne kalibreres ved at aggregere outputtet fra de enkelte kolonner i forhold til deres areal og sammenligne med udpumpningstidsserien fra Kramnitse. Målet med kalibreringen er at få vandbalancen til at passe og sikre, at der dannes afstrømning på de rigtige tidspunkter.

Der er kalibreret på den hydrauliske ledningsevne, alpha-parameteren i van Genuchten-modellen, som siger noget om, hvor tæt jorden er, og den samlede dybde af rodzonen. For sandjorden er den hydrauliske ledningsevne sat til 5 gange værdien for lerjorden, og alpha-parameteren er sat til det halve af, hvad den er i lerjorden.

Derudover har vi også kalibreret en faktor, der bestemmer, hvor stor en del af nedbøren, der sendes direkte til vandløb som overfladisk afstrømning. Hvis vi blot benyttede det befæstede areal, fik vi for store toppe ved små regnskyl. Grunden til, at man ikke kan benytte hele det befæstede areal er, at en stor del af det vand, der eksempelvis falder på vejene, blot løber af til siden og ikke direkte i vandløbet. I forbindelse med kloakmodellering kaldes det en hydraulisk faktor.

Kalibreringen er foretaget automatisk ved hjælp af programmet PEST (Doherty), og som fejlmål benyttes vandbalancen for den totale udpumpning og Nash-Sutcliffe R2 mod udpumpningstidsserien fra Kramnitse. Det skal bemærkes, at udpumpningen ikke kan sammenlignes direkte med den modellerede afstrømning fra Daisy, idet vandløbsmodellen ikke er med. Det vil betyde, at toppe af kort varighed i den simulerede afstrømning fra Daisy skal være højere end udpumpningen. Derfor har vi mest fokus på at ramme den rigtige vandbalance frem for den rigtige R2-værdi, idet vandløbene ikke påvirker vandbalancen.

Efter kalibreringen er vandbalancefejlen 6% og R2-værdien er 0.3. Ved komplet sammenfald af simuleret og observeret er R2-værdien 1. På figur 34 er vist afstrømningen fra Daisy og udpumpningen fra Kramnitse. Det ses, at toppene fra Daisy generelt ligger højere, hvilket de også skal. Det, der er værd at bemærke på figuren, er den generelle overensstemmelse mellem, hvornår toppene falder. Der er således ikke toppe i afstrømningen, som ikke genfindes i udpumpningen og omvendt. Havde det været tilfældet, ville der være fundamentale problemer med modellens repræsentation af virkeligheden.



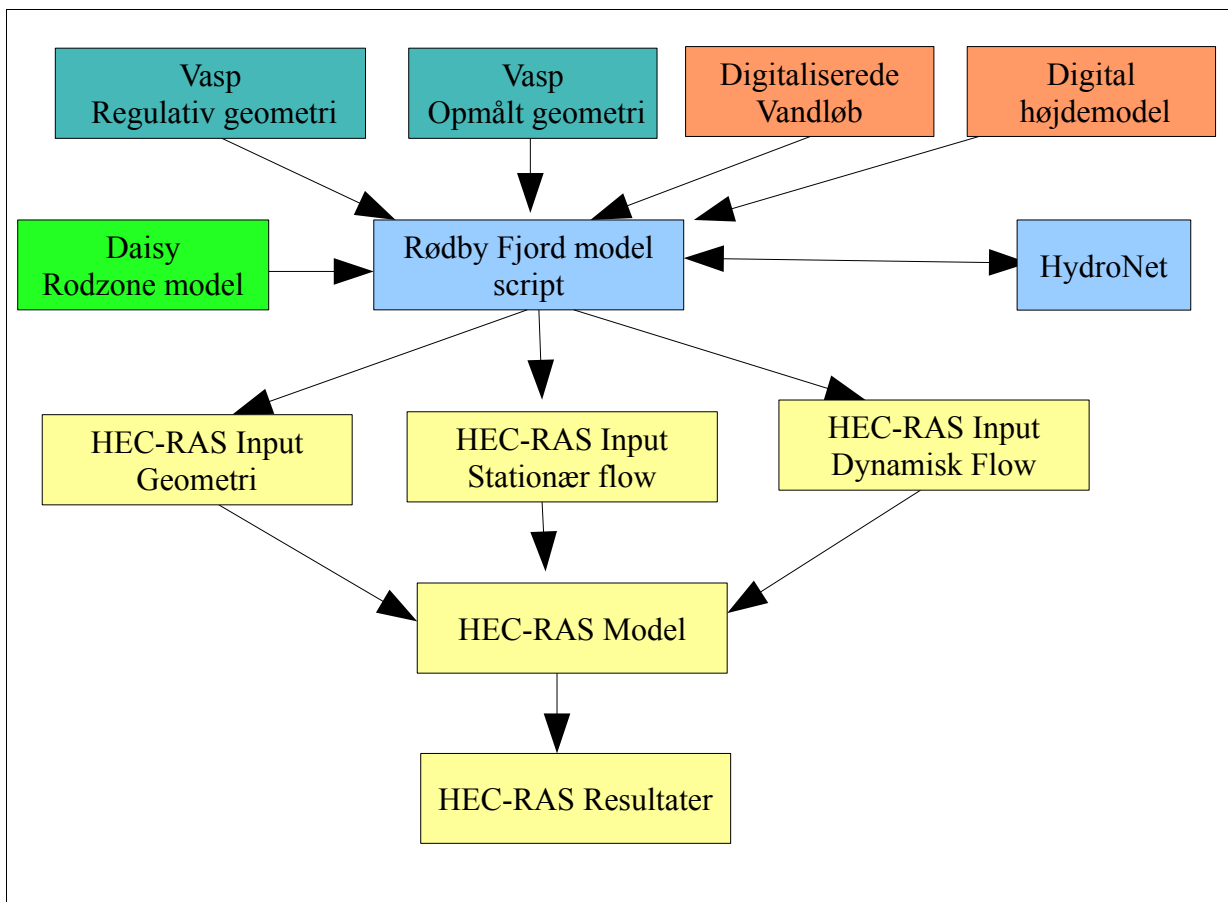
Figur 34: Afstrømning fra Daisy og udpumpningen ved Kramnitse.

5.2 HEC-RAS

Kanaler og vandløb modelleres med HEC-RAS modellen. HEC-RAS modellen er udviklet af US Army Corps of Engineers (USACE), og er en af verdens mest udbredte 1-dimensionelle fuldt dynamiske vandløbsmodeller.

HEC-RAS modellen har en grafisk brugerflade, som anvendes til at lægge data i modellen, til at afvikle modelkørsler og til at vise resultater. Modellens brugergrænseflade har mange faciliteter og er forholdsvis let at arbejde med. Man finder nogenlunde samme faciliteter i HEC-RAS' brugerflade, som man ser det f.eks. i Mike 11, som er den mest anvendte vandløbsmodel i Danmark.

På grund af de store datamængder, som skal anvendes til input for Rødby Fjord modellen, har vi valgt at automatisere processen med at lægge data i modellen. Til dette anvendes et programbibliotek, som HydroInform har udviklet, og som hedder HydroNet. HydroNet indholder en datamodel for vandløbssystemer, og en lang række funktioner til håndtering af data og validering. Med dette system kan man med få linjer programkode (omkring 100 linjer for Rødby Modellen) generere inputfiler til HEC-RAS.



Figur 35: Dataflow i forbindelse med opstilling af HEC-RAS modellen

RødbyFjord Scriptet, som anvender HydroNet, indlæser VASP filer, filer med vandløbenes geografiske placering (Digitaliserede vandløb) og henter data fra den digitale højdemodel (1.6 m

grid). Herefter processeres data, og der skrives input filer til HEC-RAS.

Denne automatiserede måde at håndtere data på har den fordel, at man hurtigt kan ændre i det omfattende modelsystem. Samtidig er der fuldstændig dokumentation for, hvilke ændringer rå-data har undergået, inden de anvendes, som input til HEC-RAS modellen, idet alle tilpasninger af rå-data fremgår af scriptet.

5.2.1 Opstilling

Følgende procedure er fulgt ved opsætningen af HEC-RAS modellen for Rødby Fjord vandløbene.

1. VASP DATA

Lolland Kommune har eksporteret VASP data fra de 10 vandløb, som indgår i modellen fra binær VASP format til VASP tekst format (ASCII filer) ved hjælp af VASP programmet. For hvert vandløb er der to filer, en med opmålte data og en med regulativ data. I filerne med opmålte data er der for hvert opmålt tværsnit sammenhørende værdier af kote (DNN) og vandret afstand langs tværsnittet, samt stationeringen for tværsnittet. I filerne med regulativ data er der for en række stationeringer angivet bundbredde, bundkote (DNN) og anlæg på vandløbssiderne. Data i de VASP filer, som der er til rådighed, indeholder ikke geografiske koordinater.

2. Tildeling af geografiske koordinater.

Da vi i projektet anvender georefererede GIS data (digital højdemodel, diverse shape filer og luftfoto og kort), skal alt i modelle have geografiske koordinater (UTM32). Ved hjælp af et GIS system (vi har anvendt QGIS) er orto luftfoto fra forår 2012 med stor opløsning anvendt som baggrundslag. Oven på dette er vandløbene manuelt digitaliseret. Data fra denne digitalisering eksporteres til kommaseparerede tekst filer.

Ved hjælp af et HydroNet kan UTM koordinater til de opmålte tværsnit bestemmes ved at flette VASP filerne og filerne for de digitaliserede vandløb, således at der fremkommer en samlet fil, hvor alle punkter (både tværsnit og vandløbspunkter) har x y og z koordinater. I denne proces sker der en udjævning i forhold til stationeringer, idet den vandløbslængde der kan beregnes ud fra de digitaliserede punkter ikke stemmer nøjagtigt overens med de tilsvarende forskelle i stationeringer fra opmålingerne. Det er kontrolleret, at der ved denne udjævning kun sker mindre korrektioner. Typiske korrektioner er på omkring 1 – 2 meter, dog i enkelte tilfælde op til 20- 30 m. Korrektionerne påvirker ikke vandløbenes fald og dermed de simulerede vandstande, idet faldet er givet ud fra tværsnittene og deres stationering. Korrektionerne kan give anledning til fejl i det tilfælde, hvor tværsnit forlænges ved hjælp af den digitale højdemodel, idet det er tværsnittenes geografiske placering der korregeres. Denne fejl vil ikke påvirke de beregnede vandstande men kan give anledning til små fejl på simulerede udbredelser af oversvømmede områder.

Det antages, at tværsnittene er tilnærmelsesvist opmålt vinkelret på vandløbets retning. Ud fra denne antagelse er UTM koordinater til alle målepunkter i tværsnittene beregnet.

3. Forlængelse af tværsnit ved hjælp af den digitale højdemodel.

Det opmålte tværsnit (VASP filerne) dækker kun selve vandløbet med tilhørende brinker. Da

vi har fokus på situationer med vand på terræn, er det nødvendigt at forlænge tværsnittene til også at dække de vandløbsnære områder. Det er sket ved, at HydroNet systemet henter højdeinformation fra den digitale højdemodel (1.6m grid) og tilføjer ekstra punkter til tværsnittene. Generelt er tværsnittene udvidet til en bredde på 200 m, men på visse strækninger, hvor udbredelsen af oversvømmelser er stor, er der anvendt tværsnitbredder på 1200 m.

4. **Styrt**

I VASP filerne optræder styrt som normale tværsnit med en angivelse af, at der er tale om et styrt. HydroNet identificerer disse tværsnit og tildeler parametre, som skal anvendes til HEC-RAS modellen.

5. **Tilretninger**

HEC-RAS modellen kræver, at der både opstrøms og nedstrøms styrt findes mindst to tværsnit i samme vandløbsstrækning. Hvor dette ikke er opfyldt tilføjes ekstra tværsnit ved at kopiere nærmeste tværsnit.

6. **Oplandsarealer**

HydroNet beregner oplandsarealer ved hjælp af delineering af den digitale højdemodel. Rødby Fjord oplandet er underinddelt i 748 deloplande. Hvert tværsnit i modellen tildeles et opland.

7. **HEC-RAS geometri fil**

Alle data udskrives til en HEC-RAS geometri fil, som direkte kan åbnes i HEC-RAS modellen.

Manning-tal

Et vandløbs hydrauliske modstand beskrives ved et Manningtal. Manningtallet er et mål for den ruhed som vandløbets bund og sider har. Ruheden udgøres af ruhed fra sten og mindre fremspring samt den grøde, som findes i vandløbet. Det er ikke praktisk muligt direkte at måle Manningtallet. Men Manningtallet kan bestemmes indirekte ved måle sammenhængende værdier af vandspejlshældning, vanddybde og vandføring og efterfølgende anvende Manningformlen til at bestemme Manningtallet. En anden og ofte anvendt metode er at opsætte en model for vandløbene og efterfølgende tilpasse Manningtallene således, at modellens beregnede vandspejlskoter passer med målte vandspejlskoter (kalibrering).

Som tidligere nævnt er Manningtallet et mål for ruheden af vandløbsbund og sider og dermed i princippet uafhængig af om det er et lille eller stort vandløb. I praksis viser det sig dog, at dette ikke er tilfældet. Med samme grødevækst vil brede vandløb have større Manningtal (relativt mindre modstand) end smallere vandløb. Yderligere vil Manningtallet afhænge af vandføringen, således at der ved store vandføringer vil være relativt mindre modstand i vandløbet end for mindre vandføringer. Dette hænger sammen med, at grøden ved store vandføringer vil lægge sig ned med strømmen og dermed ikke bremse vandet så meget, yderligere vil den del af vandløbstværsnittet som ikke er påvirket af grøde være større ved større vanddybder.

Grøden udgør en signifikant del af den hydrauliske modstand. Derfor vil Manningtallet variere over året i takt med, at grøden vokser over sommeren frem til den skæres.

I forbindelse med beregningerne for serviceniveau er der fokus på at anvende modelsystemet til at give en så præcis som mulig bestemmelse af vandspejlskoter i vandløbene i situationer med stor

sommervandføring. Dette giver en stor udfordring i forhold til at bestemme Manningtal enten ved måling eller kalibrering, idet sådanne målinger / kalibreringer skal foretages i situationer med grødevækst og høj vandføring. Sådanne situationer er, som beskrevet i det følgende, meget sjældne.

I forhold til situationen ved august 2011 oversvømmelsen er Manningtal bestemt ved kalibrering imod de observerede udbredelser af oversvømmelsen. Dette giver et estimat på Manningtal for netop denne situation. Under august hændelsen var det kun pumpekanalerne, som landvindingslaget vedligeholder, der var grødeskåret, mens tilløbene til pumpekanalerne ikke var sommervedligeholdet. Siden er der ændret praksis for grødeskæring, således at der skæres grøde også midt på sommeren i alle kanaler. Derfor kan Manningtal fra august hændelsen ikke anvendes til de nuværende sommer situationer, idet disse vil give en overestimering af oversvømmelserne.

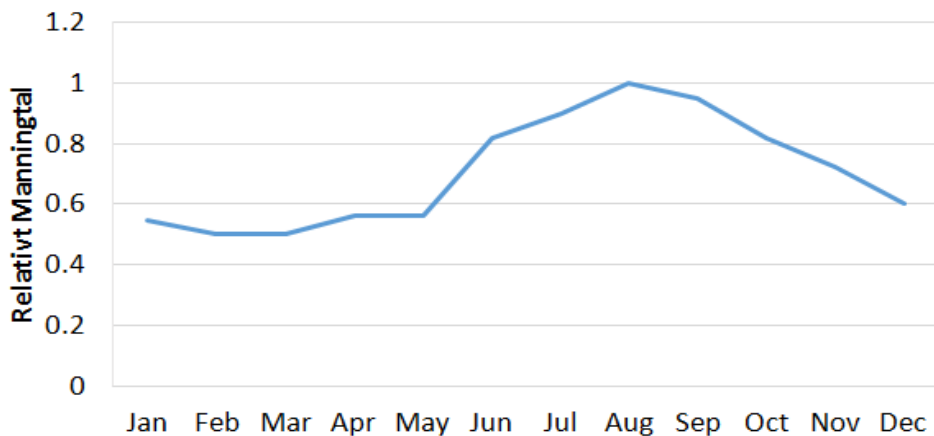
Det bedste man kan gøre for at forbedre estimatet på Manningtallet er at opsætte vandstandsloggere, således at man i fremtiden kan kalibrere sig frem til gode estimater på Manningtal for de forskellige kombinationer af vandføring og grødevækst. Sådanne vandstandsloggere er i foråret 2013 etableret fire steder i vandløbene. Men det kan tage flere år, inden der er samlet tilstrækkelig med data fra disse loggere til en god kalibrering af modellen. Derfor vil der i de følgende analyser blive anvendt erfaringstal for typiske Manningtal for forskellige situationer.

De anvendte Manningtal er vist i tabel 5 nedenfor.

Bundbredde	Tæt grødevækst	Spredt grødevækst	Ingen grødevækst
0.5 m – 2 m	8	13	17
2 m – 7 m	12	17	22
7 m 10 m	14	20	25
Over 10 m	16	22	25

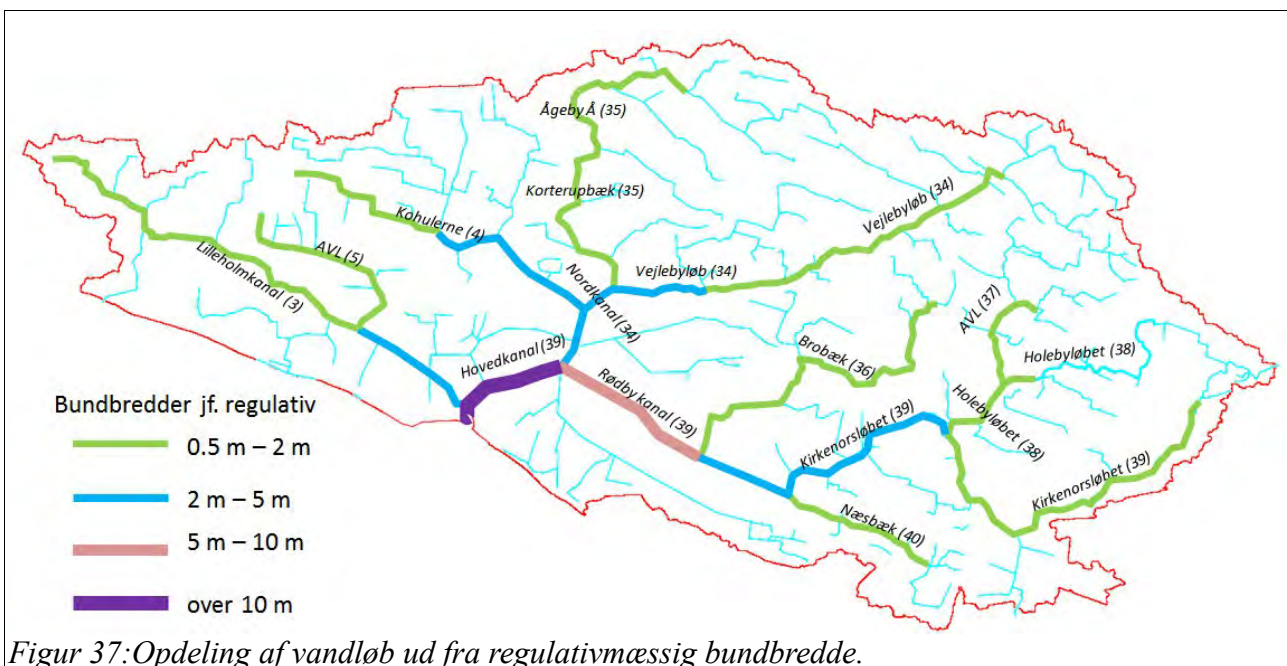
Tabel 5: Erfaringstal for Manningtal. Enhed $m^{1/3}/s$.

Variationen fra ”tæt grødevækst” om sommeren til ”ingen grødevækst” om vinteren beskrives ved kurven vist i nedenstående figur.



Figur 36: Variation i Manning-tal hen over året.

I vandløbsregulativet for vandløbene i Rødby Fjord er angivet regulativmæssige bundbredder. Ud fra disse oplysninger er vandløbene inddelt i klasser, som vist på figur 37. Denne klassificering danner sammen med tallene fra tabel 5 grundlag for, hvilke Manningtal der er anvendt for de enkelte vandløbsstrækninger.



Figur 37: Opdeling af vandløb ud fra regulativmæssig bundbredde.

Pumpen

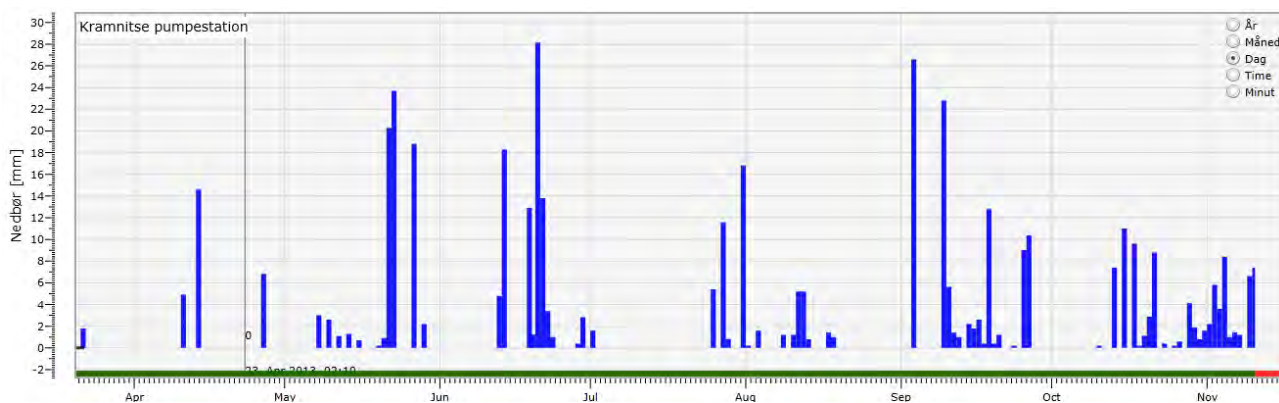
Vi har indlagt pumpestationen på forskellige måder i modellen, således at vi kan vælge den mest effektive måde til lige præcis den type simulering, der ønskes. Som udgangspunkt modelleres pumperne med et fastholdt tryk i kote -4 m. Med den metode skal man være opmærksom på, at der ikke er nogen øvre grænse for pumpekapacitet. I perioder, hvor den faktiske pumpekapacitet overskrides, skal vi derfor ind og ændre randbetingelsen til en fastholdt udpumpning i stedet.

Ønsker vi at simulere effekten af, at pumpen starter og stopper, kan vi indlægge de faktisk målte vandspejl som randbetingelse. Her skal man være opmærksom på, at der kan strømme vand ind i modellen, når vandstanden stiger, så i det tilfælde kan man få en ukorrekt vandbalance. Vi kan også simulere pumpen mere fysisk korrekt ved at give den rigtige pumpekarakteristik og nogle start- og stopkoter. Vi har dog fundet at det giver anledning til en del konvergensproblemer og det er derfor ikke hensigtsmæssigt at anvende denne metode til simuleringer, hvor man er interesseret i hele oplandet.

5.2.2 Kalibrering

HEC-RAS er en fysisk baseret model, hvor input data er baseret på målbare geometrier, såsom vandløbstværsnit og styrt. Som det fremgår af ovenstående afsnit om opstilling af HEC-RAS modellen, er kanalsystemets geometri meget velbeskrevet og inkluderet i modellen med alle detaljer. Herunder detaljerede oplandsarealer og topografiske forhold for de vandløbsnære oversvømmelsesområder i kraft af en præcis digital højdemodel. Tilbage står beskrivelsen af vandløbenes hydrauliske ruhed, som i altovervejende grad udgøres af den grødevækst, der findes på et givet tidspunkt i vandløbene. Den hydrauliske ruhed beskrives ved et Manningtal for de enkelte vandløbsstrækninger. Yderligere er det muligt at differentiere mellem ruheden i selve vandløbet og den ruhed, som oversvømmede områder langs vandløbet har.

I forbindelse med projektet er der blevet opstillet fire vandstandsloggere, som har målt vandstanden hvert 10. minut siden 18. april 2013. Endvidere er de daglige målinger af nedbør ved Kramnitse blevet suppleret med en automatisk måling, således at vi har målinger hvert 10. minut siden 20. juni. Siden 20. juni har vi også modtaget data om pumpedriften, således at vi ligeledes har en tidsserie over udpumpningen med interval på 10 minutter. Den daglige nedbør er vist på Figur 38.

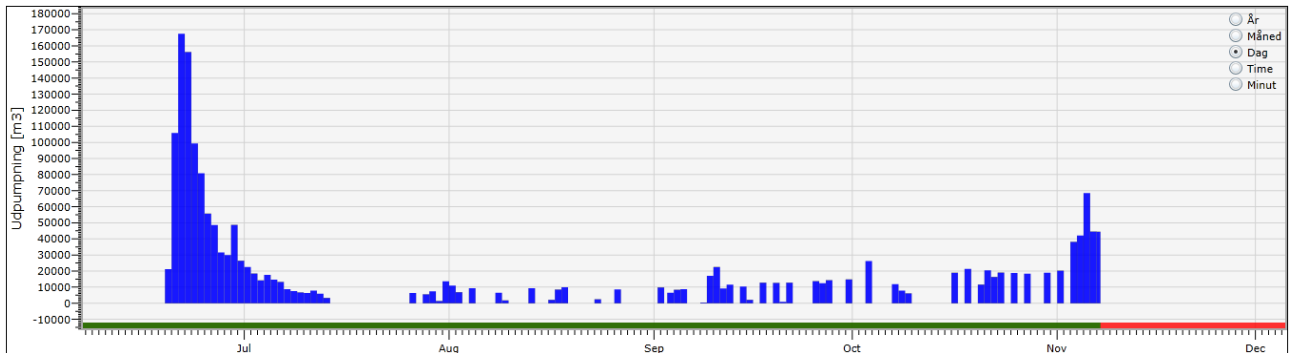


Figur 38: Daglig nedbør ved Kramnitse siden opstillingen af vandstandsloggerne.

Siden opstillingen af vandstandsloggerne har det været relativt tørt. Den maksimale daglige nedbør har været på 28 mm, og der har ikke været lange sammenhængende perioder med nedbør. Derfor har der heller ikke været meget vand i kanaler, og heller ikke meget udstrømning

Figur 39 viser udpumpningen, og det ses, at der er flere dage, hvor pumpen slet ikke har været i drift. I perioden fra 14. til 28. juli mangler data. Den maksimale udpumpning lige i starten af pumpetidsserien svarer til ca. 0,8 mm regn for hele oplandet i løbet af et døgn. Indtil nu har

fordampningen altså været stor nok til at fjerne det meste af nedbøren.



Figur 39: Daglig udpumpning ved Kramnitse. Bemærk at tidsskalaen er forskellig fra Figur 38.

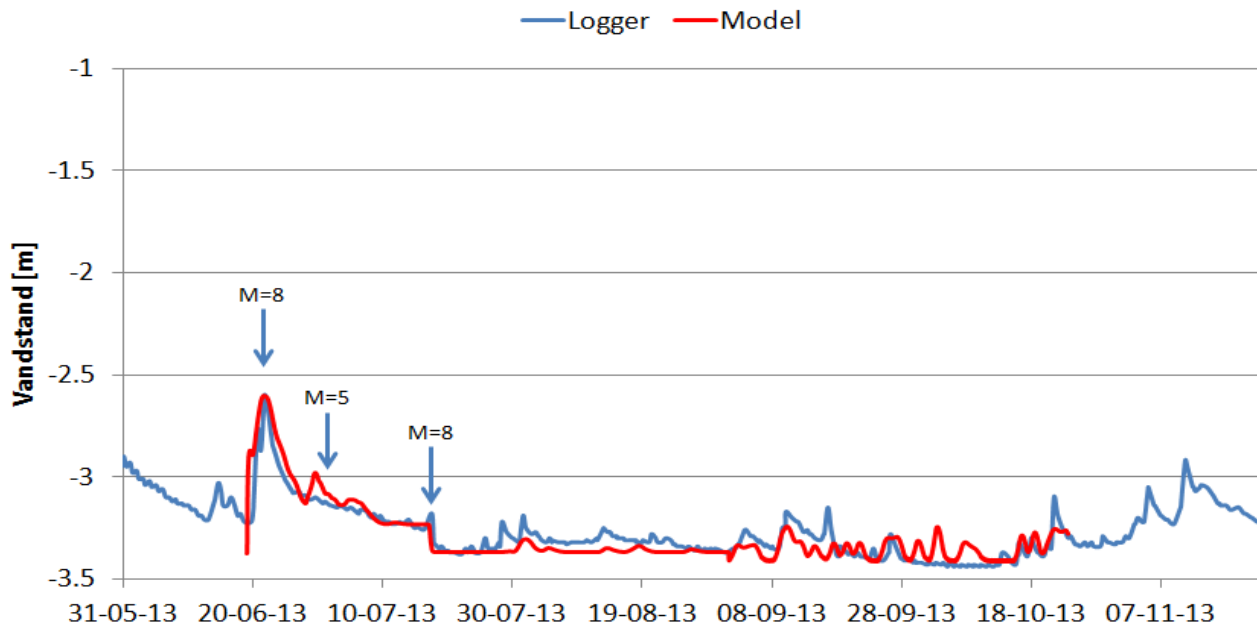
Idet fokus for modellen er at simulere de høje afstrømninger, mener vi ikke, at vi på baggrund af disse data kan kalibrere mere repræsentative Manning-værdier end de erfaringsværdier, der er lagt ind i modellen. Vi vil derfor ikke benytte data til kalibrering, men til en test af modellen i stedet.

5.2.3 Modeltest

I dette afsnit testes HEC-RAS modellen mod de målte data fra vandstandsloggerne og udbredelsen af oversvømmede områder

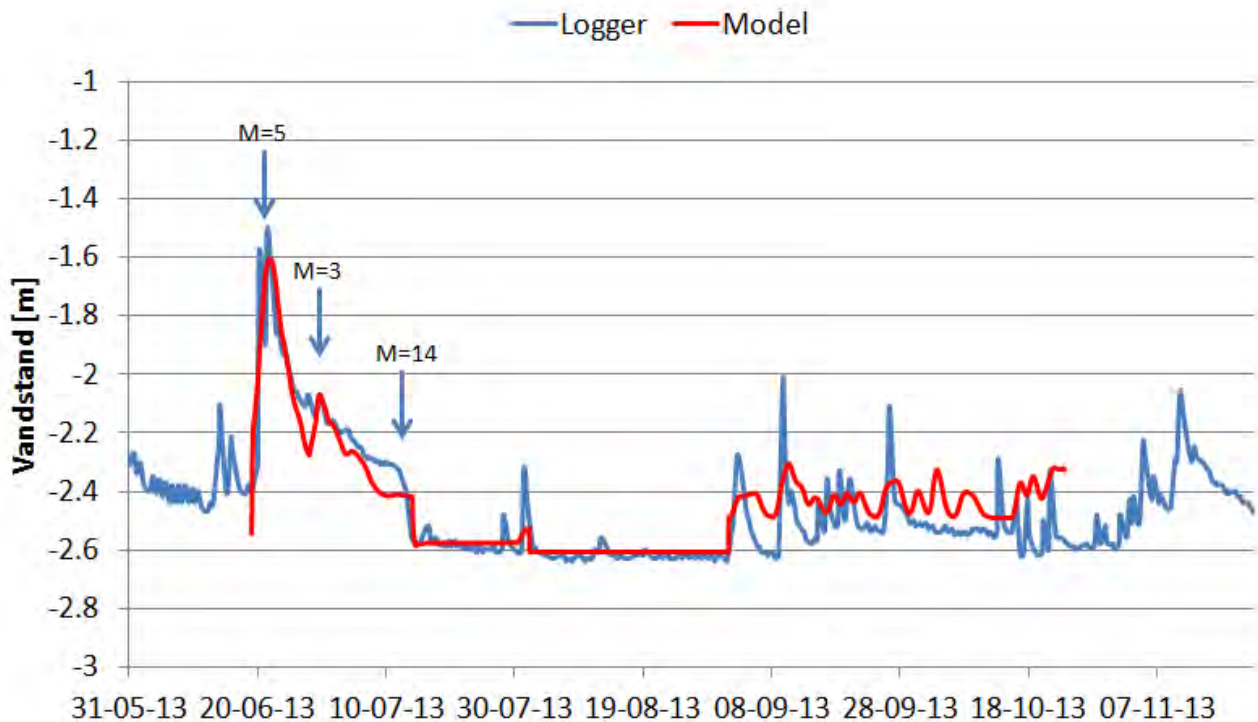
Vandstandslogger

Selvom de målte vandstande ikke kan bruges til en stringent kalibrering, er de meget værdifulde som en test af modellen. Hvis modellen ikke kan tilpasses, så den rammer tilfredsstillende, må der være noget galt. På Figur 40 sammenlignes den målte og den modellerede vandstand for loggeren i 3L ved Hummingen. Manning-tallet er i starten af perioden sat til 8 for at ramme den første top. Efter toppen var det nødvendigt at sænke Manning-tallet til 5 for at opretholde vandstanden ved det meget lave flow. Den 17. juli blev der skåret grøde, hvilket er modelleret ved at igen øge Manning-tallet til 8. Den fysiske begrundelse for de to forskellige Manning-tal før grødeskæringen er at der er tale om situationer med så godt som stillestående vand i bunden af vandløbet, hvor grøden vil have meget stor påvirkning. I perioden med større strømning kan vandet strømme over grøden, og er derfor mindre påvirket. Loggeren er placeret lige i starten af en vandløbsgren, som ifølge figur 98 skulle have et Manning-tal på 12 ved fuld grøde. Det giver os dog ikke anledning til at ændre på fordelingen af Manning-tal, da vi stadigvæk kun betragter strømning helt nede i bunden af vandløbet. Derfor kan det stadig være rigtigt med et Manning-tal på 12 ved højere afstrømning, som er fokusområdet for modellen.



Figur 40: Modelleret og målt vandstand ved Hummingen.

På figur 41 er udført den samme øvelse for loggeren ved Maribovej i 39L. Her ses for det første en større effekt af grødeskæringen. Derudover er det også mere tydeligt, at modellen ikke rammer toppene så godt, hvilket vi tilskriver, at afstrømningen er sat til den udpumpede mængde. Eftersom loggeren står et godt stykke fra pumpen, vil toppene blive være udjævnede. Endvidere er den også mere påvirket af afstrømning fra befæstede arealer end resten af området.



Figur 41: Modelleret og målt vandstand ved Maribovej.

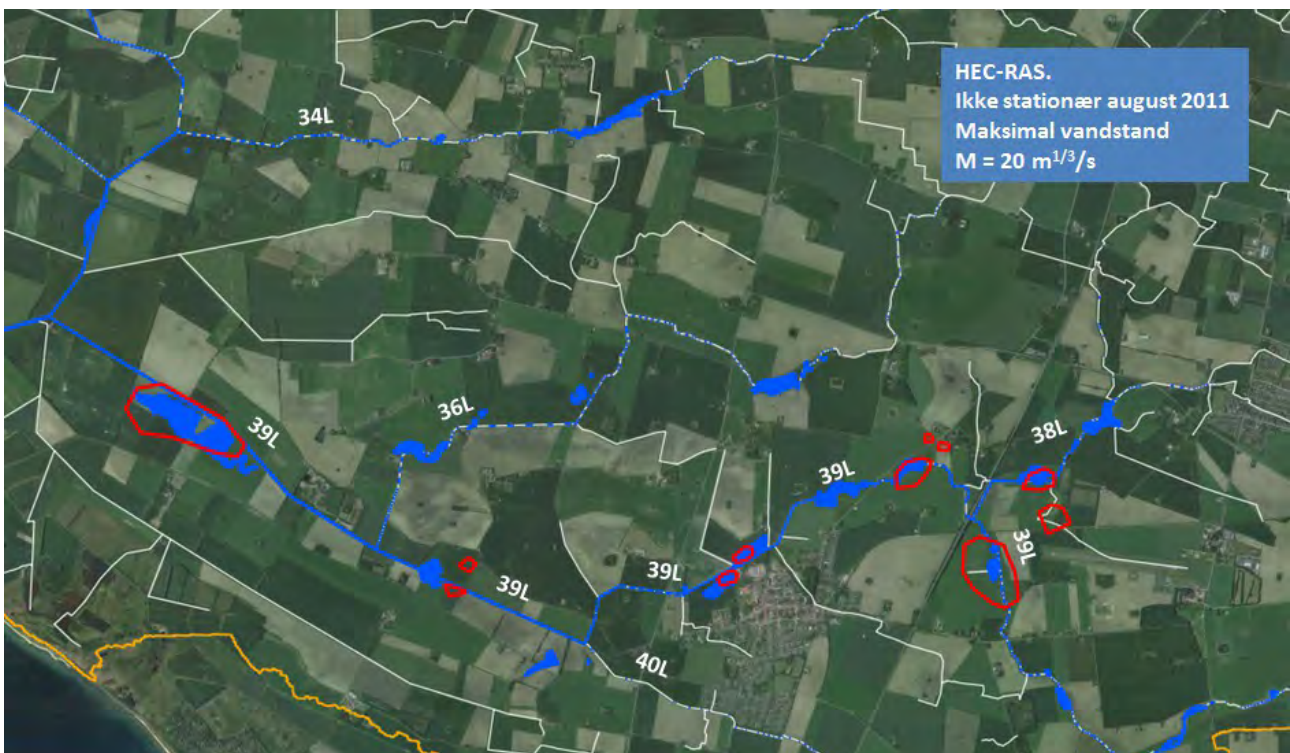
Udbredelse af oversvømmelser

I forbindelse med oversvømmelsen i august 2011 blev udbredelsen af oversvømmelsen fotograferet fra luften. Lolland Kommune og Rødby Fjord Landvindingslag har med baggrund i billederne og erfaringer fra hændelsen i 2011 lavet en skitse over udbredelsen af de oversvømmede områder. Yderligere er der lavet skitser med udbredelsen af oversvømmelser for en typisk vintersituation.

For at teste, at HEC-RAS modellen kan ramme udbredelsen af disse oversvømmelser, er modellen kørt ikke stationært for august 2011 med anvendelse af afstrømningsdata svarende til den registrerede udpumpninger fra Kramnitse pumpestation. Udpumpningen er omsat til specifik afstrømning og fordelt som indstrømning til vandløbssystemet efter oplandsarealer for hvert tværsnit. Der er anvendt samme Manningtal ($20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) for alle vandløb. Resultatet er vist på Figur 42 og Figur 43, hvor den maksimale udbredelse af oversvømmelsen er vist.



Figur 42: Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinteroversvømmelse 2010 (gule polygoner) (se større figur appendiks)



Figur 43: Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder) og skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) (se større figur i appendiks)

Konceptuelt er modellen i overensstemmelse med de observerede udbredelser af oversvømmelsen. Dog viser modellens resultater oversvømmede områder, som ikke er markeret i de optegnede skitser. Det er ikke nødvendigvis et udtryk for, at modellen overestimerer udbredelsen af våde områder, idet det også kan skyldes, at de optegnede skitser ikke inkluderer alle oversvømmede områder.

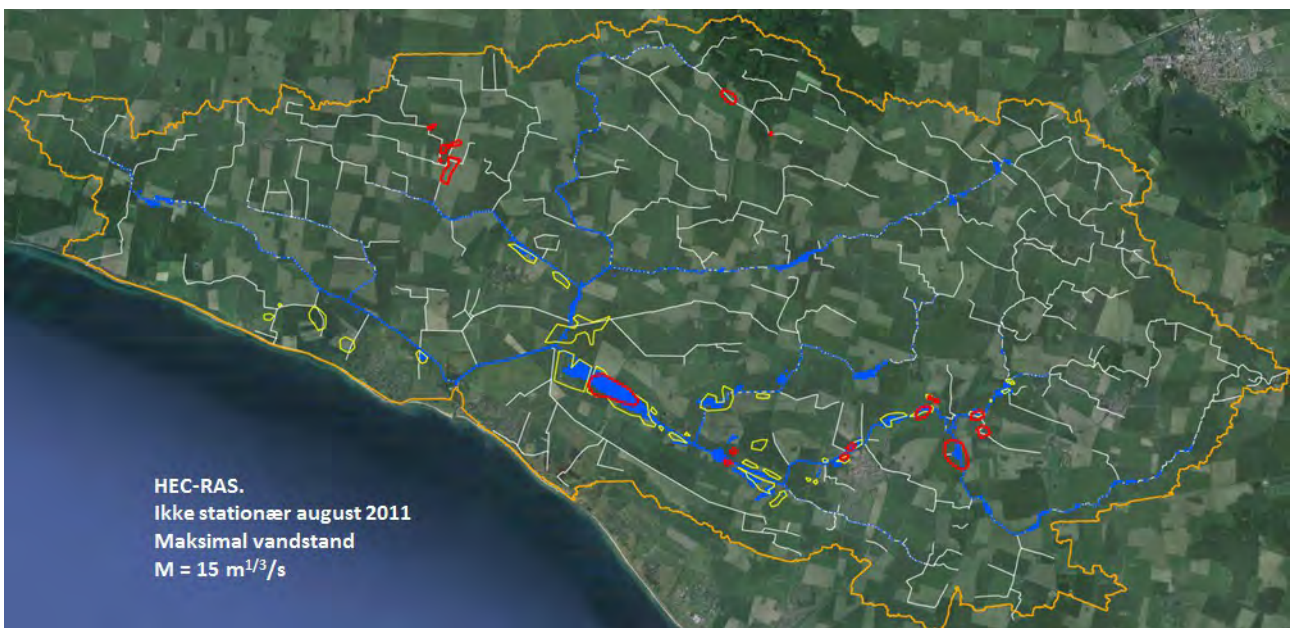
For at vurdere modellens følsomhed i forhold til valg af Manningtal er der lavet ikke-stationære modelkørsler for Manningtal 12, 15, 20 og 25. På figurerne 44 til 47 nedenfor er resultaterne fra disse vist sammen med skitserne for august 2011-oversvømmelsen og skitserne for en typisk vinteroversvømmelse. Større versioner af disse figurer kan ses i appendiks. I appendiks figur 107 er vist samme simuleret udbredelse af oversvømmede områder, hvor resultaterne er samlet i en figur.



Figur 44: Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner)



Figur 45: Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner) (Se større version i appendiks)



Figur 46: Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner) (Se større figur i appendiks)



Figur 47: Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner) (Se større figur i appendiks)

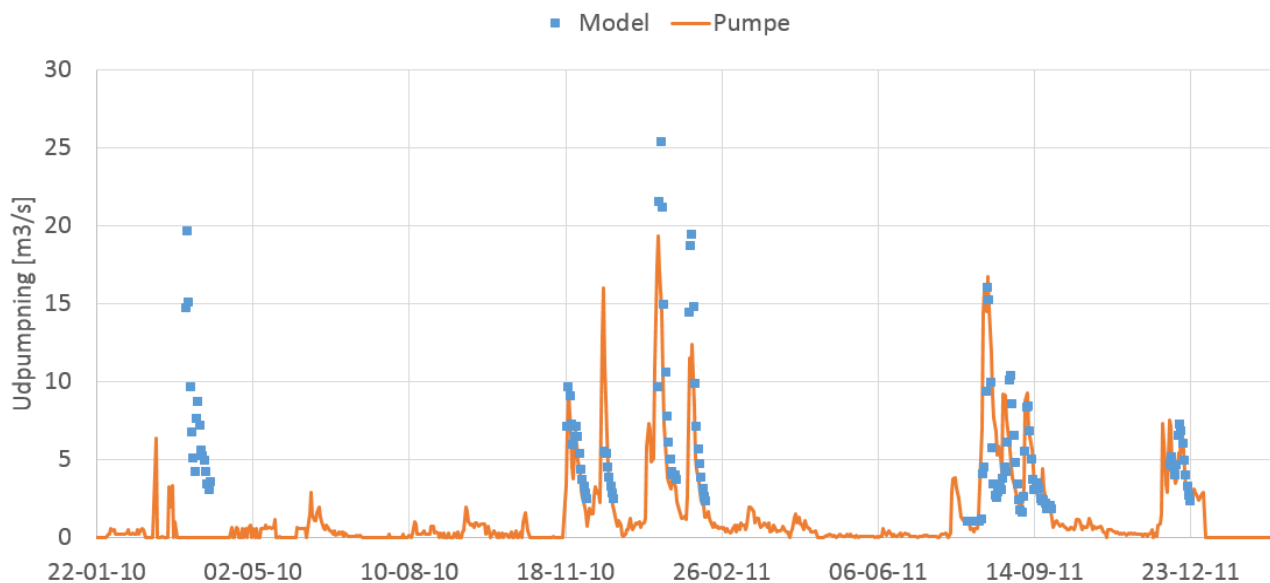
5.3 Rødby Fjord modellen

Rødby Fjord modellen er kombinationen af DAISY-modellen og HEC-RAS-modellen.

Det er forholdsvist beregningskrævende at køre vandløbsmodellen, og specielt perioder med meget lav strømning er beregningsmæssigt krævende. Eftersom disse perioder heller ikke er så interessante for formålet med dette projekt, har vi lavet kode, så vi automatisk kan køre HecRas for perioder med højt afstrømning (perioder med lav afstrømning overspringes). Herefter er beregningstiden for hele perioden 1990 til 2011 lidt over en time.

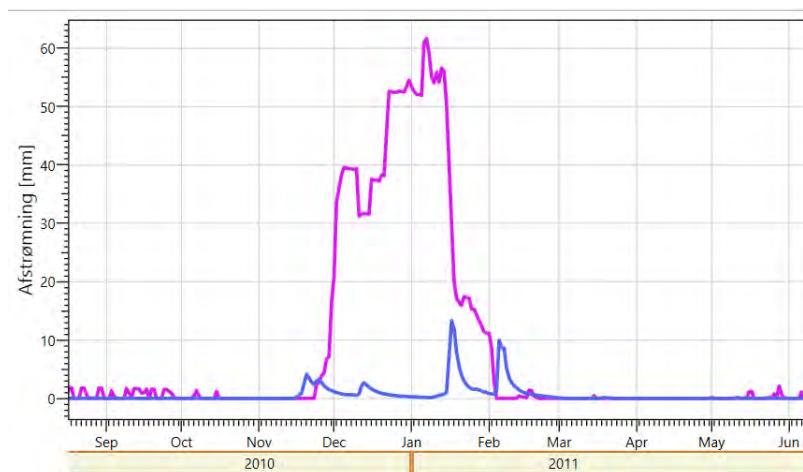
5.3.1 Modeltest

Figur 48 viser en sammenligning af simuleret og observeret udpumpning ved Kramnitse, hvor kun perioderne med høj afstrømning er simuleret.



Figur 48: Sammenligning af simuleret og observeret udpumpning.

Den første top i marts 2010 hænger sammen med en voldsom snesmeltning, hvor der desværre mangler data i pumpetidsserien. Derfor ser det ved første øjekast ud, som om en der er en uoverensstemmelse mellem model og observation, hvilket altså ikke er tilfældet. De næste toppe kommer i forbindelse med først en regnhændelse i november 2010 som rammes meget præcist. Derefter følger tre toppe, hvor den første underestimeres og de to næste overestimeres. Ved at betragte Daisy-resultatet fra den pågældende periode kan vi se, at det drejer sig om sneafsmelting, hvilket er illustreret på figur 49. Efter den første regnhændelse i november magasineres nedbøren som sne, med en kort periode med afsmeltning i december. Det er afsmeltningen i denne korte periode, der ikke simuleres helt korrekt af modellen. Det bevirker dels, at den første top bliver for lav, men også at de næste bliver for høje, da der så er opmagasineret for meget sne.



Figur 50: Tidslig udvikling i "vand på terræn"/sne (Lilla kurve) og afstrømning (blå kurve) for en enkelt Daisy-kolonne

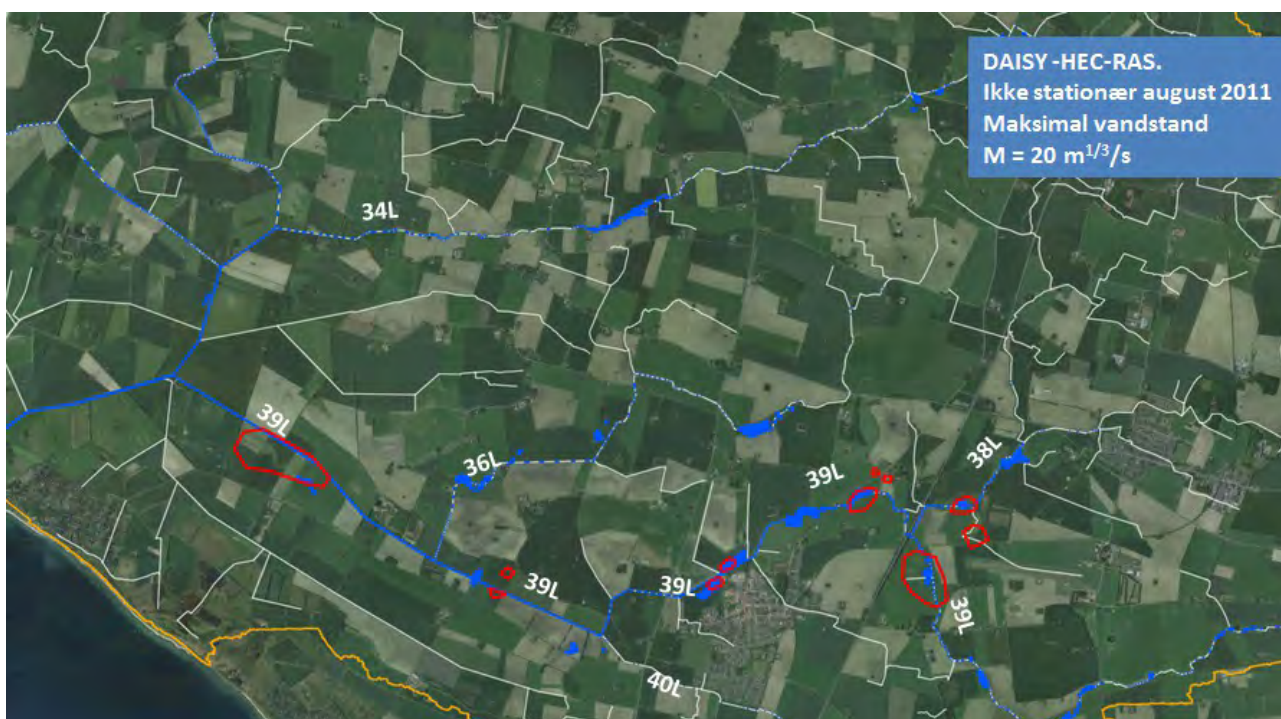
For den vigtige hændelse i august 2011 ses god overensstemmelse mellem modellen og det

observerede.

En yderligere bemærkning til figur 49 er, at der er enkelte værdier, der overstiger 20 m³/s, hvilket er pumpens maksimale kapacitet. Det kan lade sig gøre i modellen, fordi pumpen her blot simuleres som et fastholdt tryk i kote -4m.

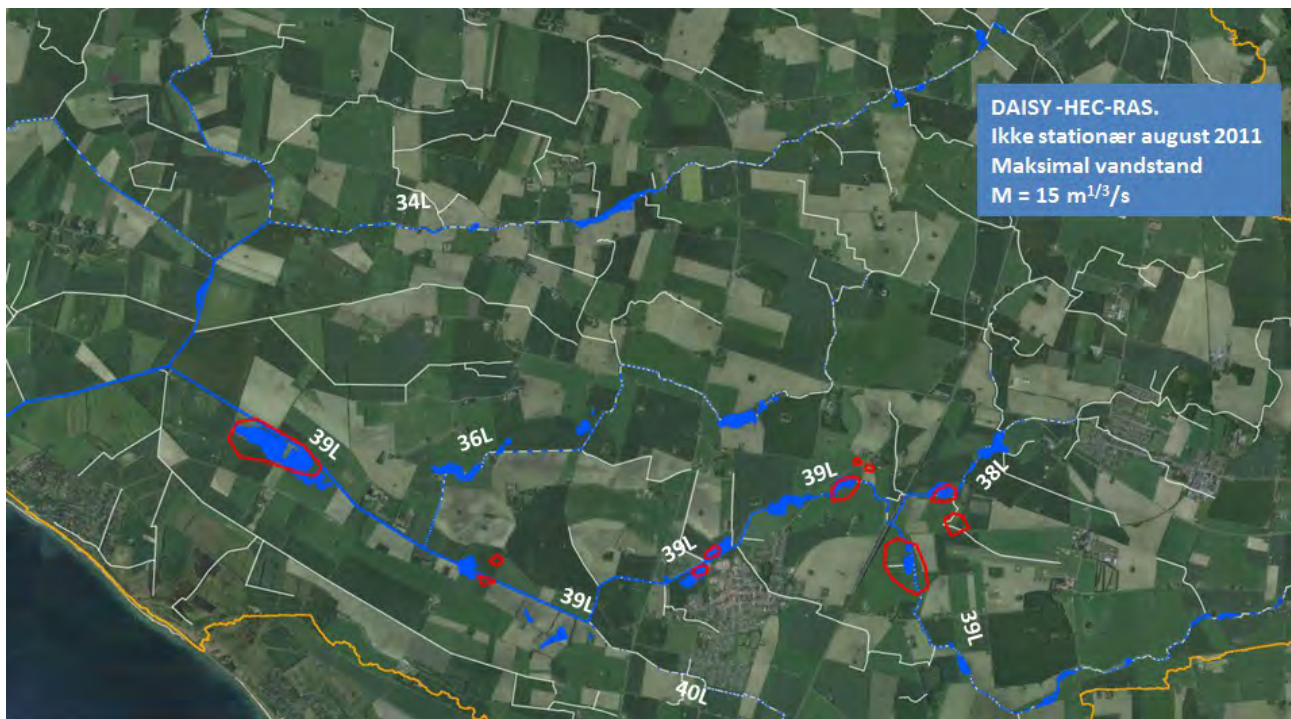
5.3.2 Validering mod udbredelse af oversvømmelser

På figur 51 nedenfor er vist simulerede maksimale udbredelser af oversvømmelse i august 2011 med den kombinerede DAISY-HEC-RAS model sammen med de skitserede observerede udbredelser. Det ses, at oversvømmelsen underestimeres på den nedre del af vandløb 39L, mens der er bedre overensstemmelse længere opstrøms vandløb 39L. Denne forskel hænger sammen med, at DAISY i kalibreringen underestimerer den maksimale afstrømning. Yderligere er der for simuleringen af 2011 de forhold, at der benyttes nedbørsdata som daglige værdier, hvilket betyder at maksimale afstrømningsværdierne, som DAISY giver vil blive udjævnet (mindre).



Figur 51: Samlet DAISY- HEC-RAS model. Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder) og skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) (se større figur i appendiks)

For eksemplets skyld er der lavet en simulering med DAISY HEC-RAS, hvor Manningtallet i HEC-RAS er ændret til 15. Resultatet af denne kørsel er vist på figur 52 nedenfor. Her ses bedre overensstemmelse mellem observeret og simuleret udbredelse af oversvømmelsen.



Figur 52: Samlet DAISY- HEC-RAS model. Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder) og skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) (Se større figur i appendiks)

Uden for Rødby Fjord var der i august 2011 ikke skåret grøde, og Manning-tallet har derfor sandsynligvis været lavere end 15. Derfor vil simuleringen vise en mindre udbredelse af de oversvømmede områder, hvilket faktisk også ses i den mest opstrøms gren af 39L.

6 Hydrologiske/hydrauliske analyser

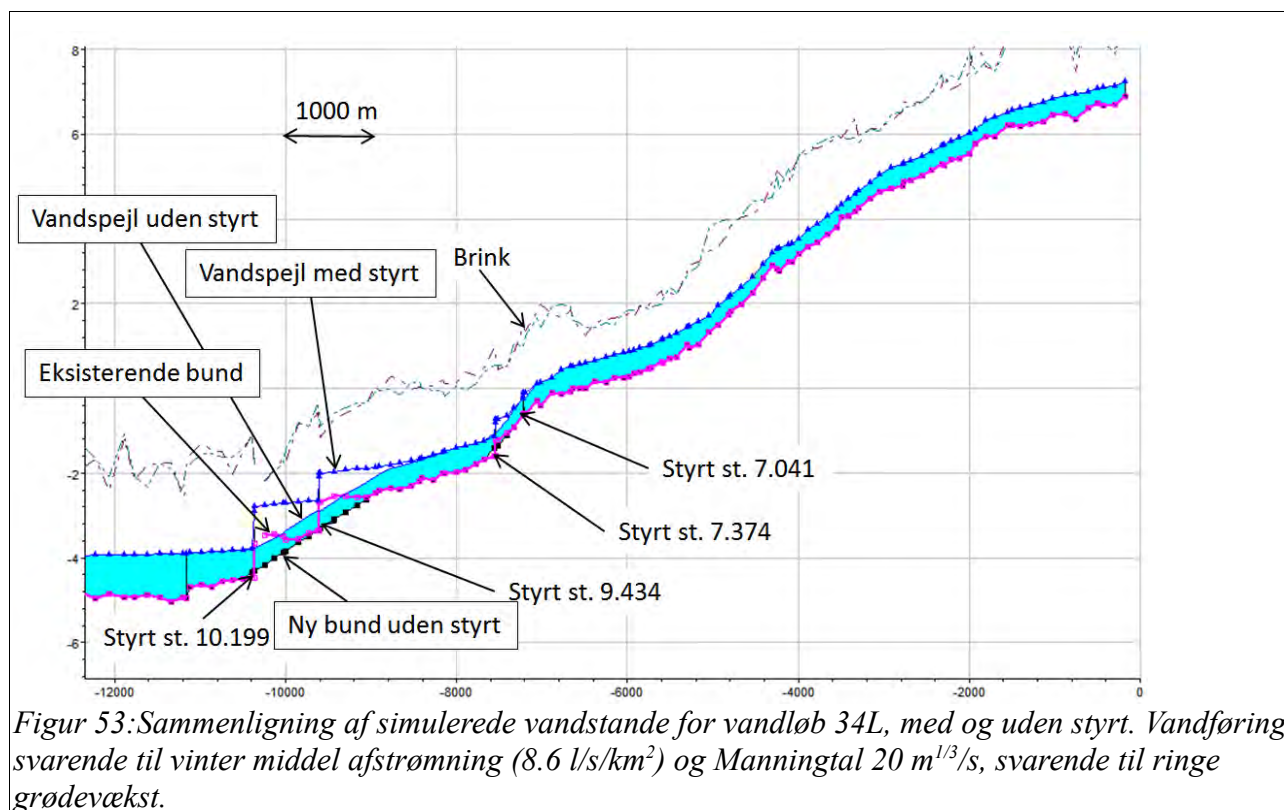
I dette kapitel beskrives de hydrologiske og hydrauliske analyser, der er blevet udført for at svare på konkrete spørgsmål fra interessent-gruppen.

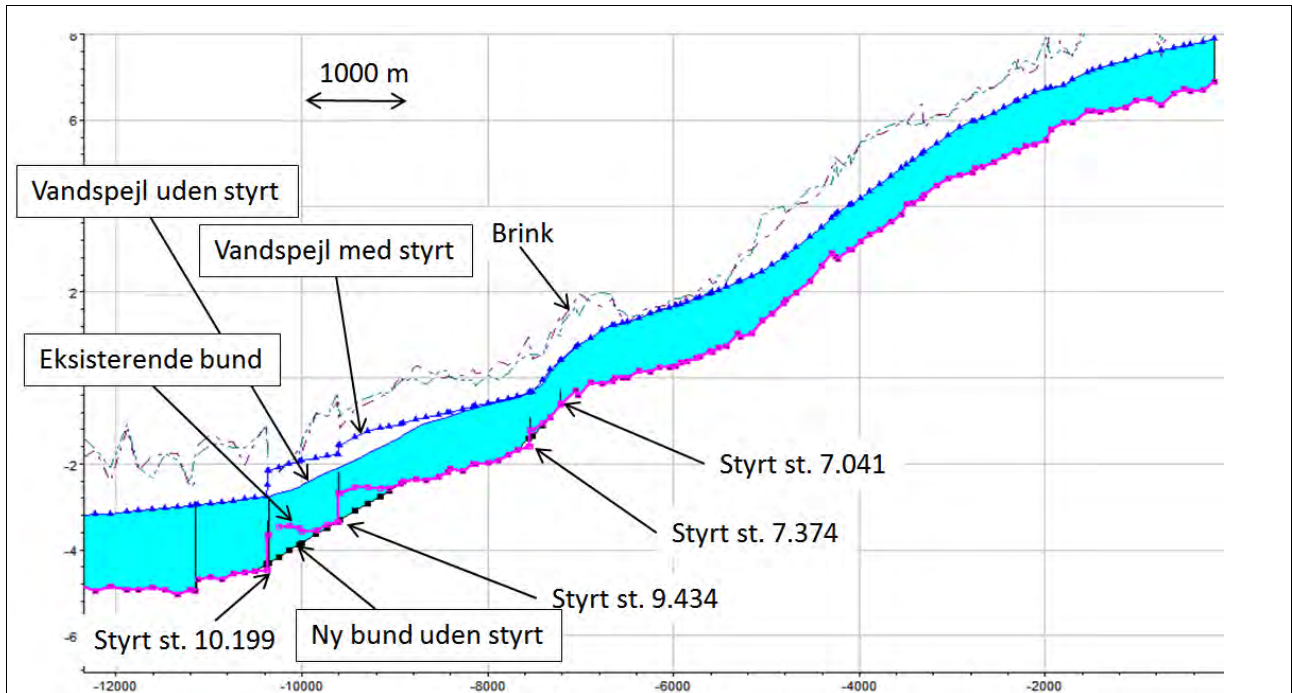
6.1 Fjernelse af styrt

Der findes på hovedkanalerne i Rødby fjord 9 styrt (se afsnit 4.1.2). Det er en nærliggende tanke, at disse styrt vil bidrage til en forhøjet vandstand opstrøms disse og at fjernelse af nogle eller alle styrt vil kunne bidrage til at afhjælpe problemer med oversvømmelse og høje vandstande. For at undersøge dette er HEC-RAS modellen anvendt til at sammenligne vandstande i vandløb 34L, med de fire eksisterende styrt og hvor disse er fjernet.

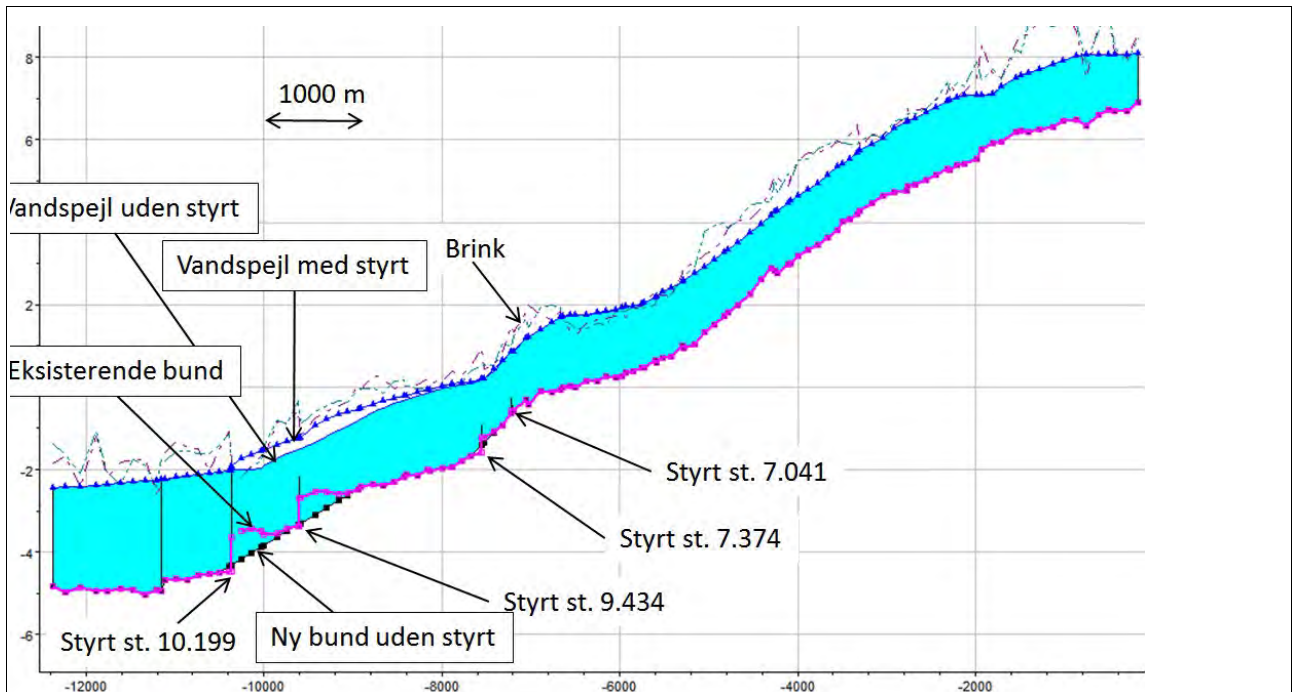
For beregningerne uden styrt er der udover fjernelse af styrt også ændret på vandløbsbunden opstrøms disse. Hvis selve den betonkonstruktion, som udgør styrtene, fjernes vil vandløbsbunden blive eroderet ned til et jævnt faldende forløb. Så for at få en realistisk simulering af situationen uden styrt er bunden i modellen tilrettet til det niveau den skønnes at ville indtage efter fjernelse af styrtene. Der er lavet sammenligninger af vandstande for vandføringer svarende til vintermiddel afstrømning ($8,6 \text{ l/s/km}^2$), vinter maksimumsværdi (58 l/s/km^2) og afstrømning svarende til den som oplevedes under august 2011 oversvømmelsen (80 l/s/km^2). For de to første simuleringer, som er vinterhændelser anvendes Manningtal $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, svarende til lille modstand fra grøde, medens der for august hændelsen anvendes Manningtal $12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, som svarer til en kanal med grødevækst.

De simulerede vandstande er vist på figurerne 53, 54 og 55.





Figur 54: Sammenligning af simulerede vandstande for vandløb 34L, med og uden styrt. Vandføring svarende til vinter maksimum median afstrømning (58 l/s/km^2) og Manningtal $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, svarende til ringe grødevækst.



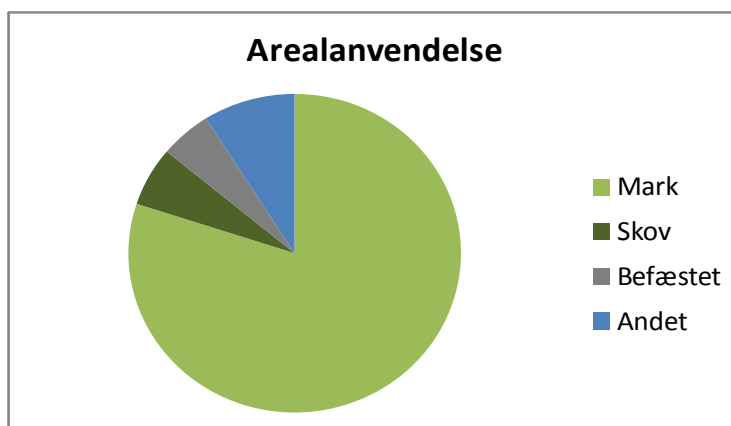
Figur 55: Sammenligning af simulerede vandstande for vandløb 34L, med og uden styrt. Vandføring svarende til maksimal afstrømning i august 2011 (80 l/s/km^2) og Manningtal $12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, svarende til sommer grødevækst.

Beregningerne viser, at fjernelse af styrtene giver en et vandspejlsfald umiddelbart opstrøms styrtene. Men allerede 1000m opstrøms styrtene er der kun meget ringe forskel på situationen med og uden styrt. Fjernelse af styrt vil dermed kun have ringe gavnlige virkning på oversvømmelsesproblematikken

6.2 Afstrømning fra bymæssige og befæstede arealer

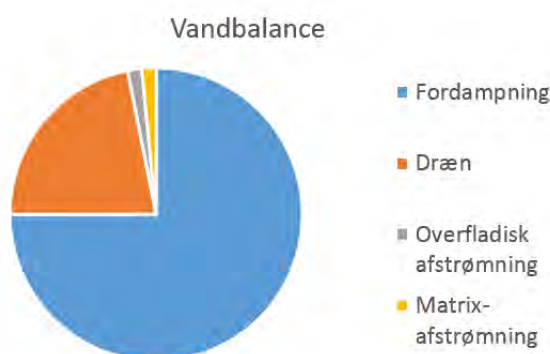
Det har været diskuteret, hvor stor en effekt det befæstede areal har. Vi vil i dette afsnit beskrive, hvilken effekt arealanvendelsen har på nogle udvalgte parametre.

På figur 56 er vist arealanvendelsen inden for oplandet, som den er beskrevet i modellen.



Figur 56: Arealanvendelse inden for oplandet

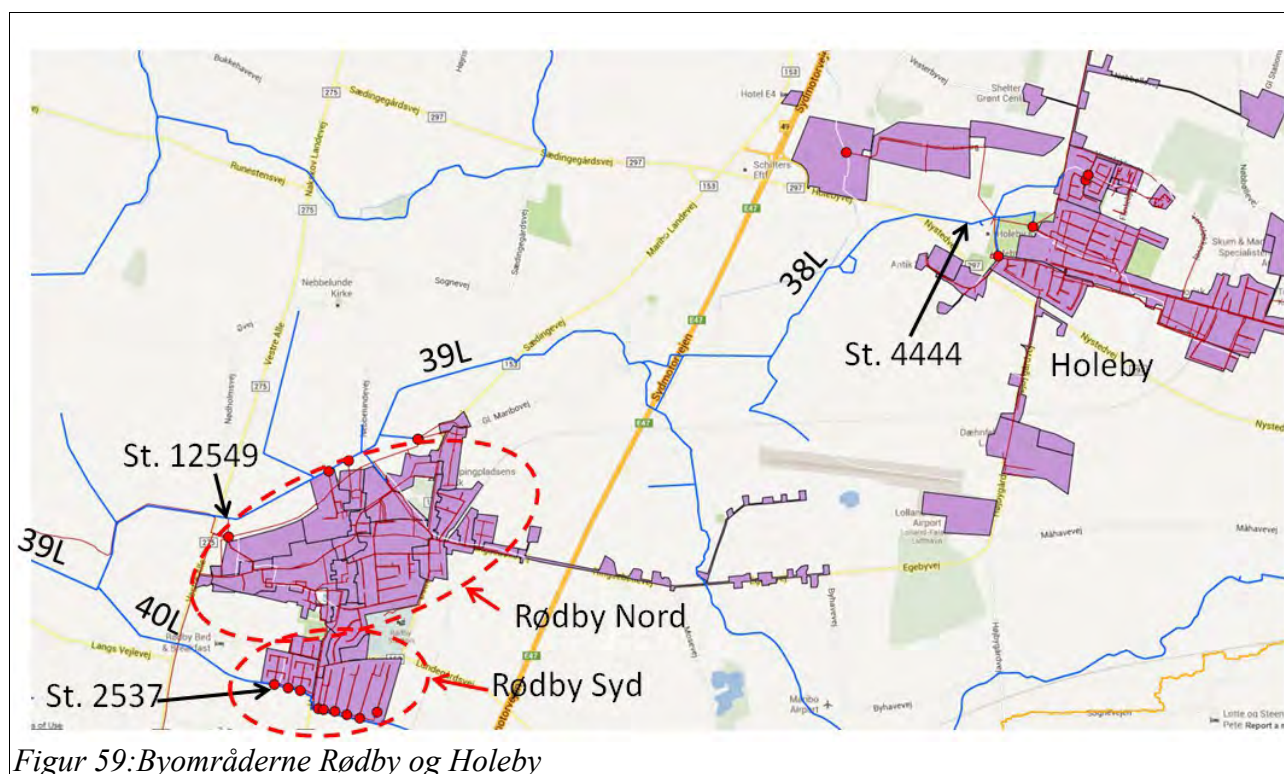
Med "befæstet" menes her det egentlig befæstede areal, altså arealet af veje, tag, parkeringspladser. Det er ikke arealet af bymæssig bebyggelse, som ville inkludere haver, men ikke veje på landet. "Andet" er arealer, der ikke er indberettet som dyrkede, og heller ikke er decideret befæstet såsom eksempelvis haver, grøftkanter, søer, vandløb osv. De kloakerede områder i Rødby og Holeby udgør 1.4 % af det samlede areal. Det er dog langt fra alt nedbør fra disse arealer, der ledes til kloak, idet arealet også indeholder haver. I modellen har vi ikke taget højde for, at en del af vandet fjernes i kloakken.



Figur 57: Simuleret vandbalance for hele området for perioden 1990-2012

Byområderne påtrykkes en syntetisk 30 minutters regn med en gennemsnitlig gentagelsesperiode på 10 år (CDS Regn). Intensiteten for denne nedbørshændelse er beregnet ved hjælp af spildevandskomiteens regneark (Skrift 28), hvor der anvendes klima/sikkerhedsfaktor på 1.3 og en middel årsnedbør på 600 mm, svarende til Nakskov nedbør (SVK31511 måleren). Dette giver en 30 minutters regn med konstant intensitet på 11µm/s, som er det samme som 1100 l/s/km² eller 20 mm regn på en halv time.

Lolland forsyning har oplyst, at der findes forsinkelsesbassiner, men vi kender ikke detaljerne om disse. I nedenstående analyse (worst-case) indregnes, der ikke forsinkelsesbassiner.



Det antages, at overløb fra det nordlige Rødby ledes til vandløb 39L ved station 12.549, overløb fra det sydlige Rødby ledes til vandløb 40L station 2.537 og overløb fra Holeby ledes til vandløb 38L ved station 4.444 (se figur 59).

Byområderne er opmålt på GIS kort og det anslås, at reduktionsfaktoren i forhold til befæstede områder er 0,2.

Opmålte arealer og udløbsflow, som anvendes i modelscenariet, er angivet i tabel 6 nedenfor.

For at kunne estimere den effekt den bymæssige tilledning har på vandstanden i vandløbene, skal der antages en basis afstrømning i vandløbene. Basisafstrømningen er den afstrømning, som vandløbene har som følge af afstrømning fra det åbne land uden bytilledningen. Der er ikke nødvendigvis nogen sammenhæng mellem høj bymæssig tilledning og høj basis afstrømning, idet basisafstrømningen bestemmes af nedbøren over en længere periode, mens den højintense bymæssige tilledning vil stamme fra en kortvarig nedbørshændelse, som f.eks. en tordenbyge.

Men for at følge tilgangen med at finde et ekstremt tilfælde regnes med en høj basisafstrømning i vandløbene svarende til maksimum median værdier for henholdsvis sommer og vinter (se tabel 6).

Maksimum median afstrømning vinter for Rødby Fjord er 55 l/s/km²

Maksimum median afstrømning sommer Rødby Fjord 20 l/s/km²

Maksimum værdierne svarer til den største værdi der i gennemsnit vil optræde hvert andet år, altså en to-års hændelse.

	Rødby nord	Rødby Syd	Holeby
Udløbspunkt	Kanal 39L st. 12.549m	Kanal 40L st. 2.537m	Kanal 38L st. 4.444m
Bymæssig areal	3,5 km ²	1,3 km ²	2,7 km ²
Reduceret byareal (afløbskoefficient 0,2)	0.7 km ²	0.3 km ²	0.5 km ²
CDS 10 års 30 minuttens nedbør omsat til udløb.	7700 l/s	3300 l/s	5500 l/s
Hydrologisk opland	46 km ²	5 km ²	7 km ²
Landafstrømning sommer. (max. median)	920 l/s	100 l/s	140 l/s
Landafstrømning vinter (Max. median)	2530 l/s	275 l/s	385 l/s

Tabel 6: Hydrologiske værdier ved udløbspunkterne for bymæssig tilstrømning fra Rødby og Holeby.

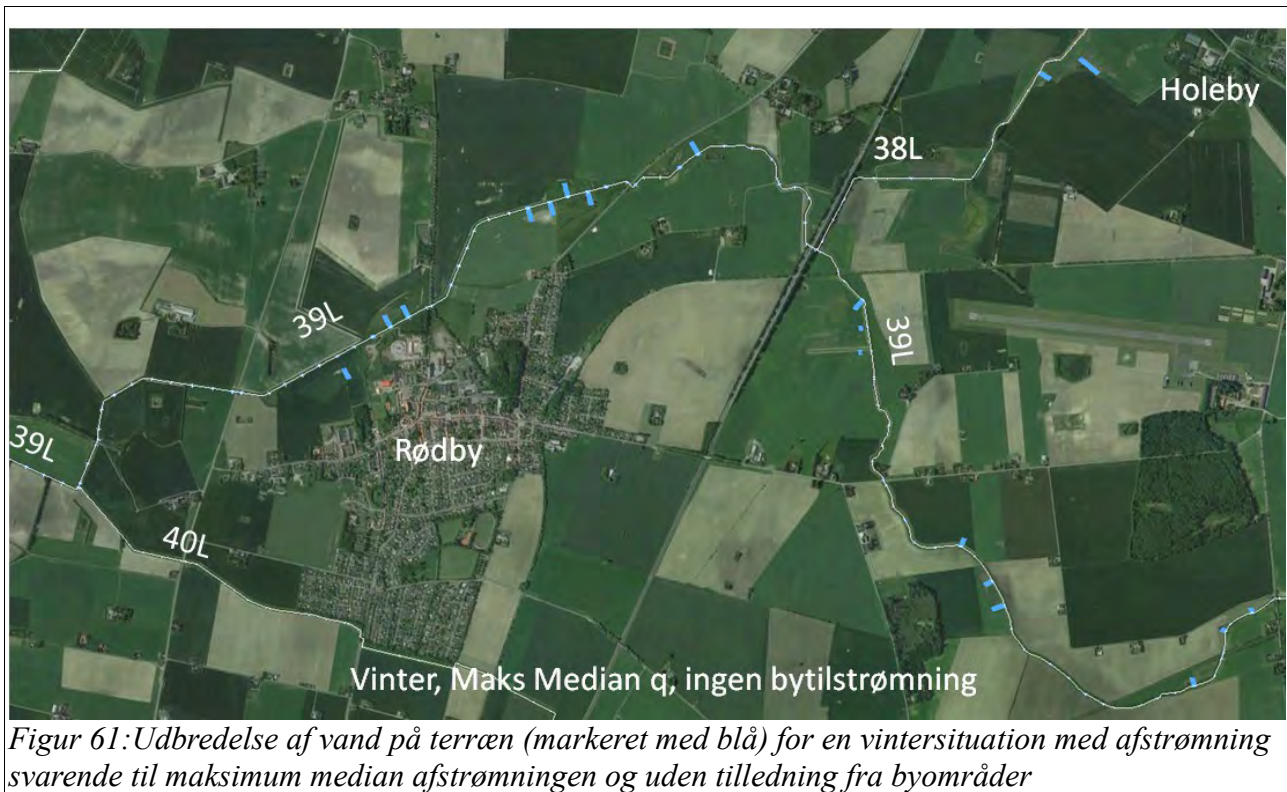
Resultaterne af modelberegningerne ses af de følgende figurer.

For sommer-situationen giver maksimum median afstrømningen alene ikke anledning til oversvømmelse. Når den kraftige byudstrømning tilledes, opstår der vand på terræn få steder. (se figur 60) Oversvømmelsen sker på vandløb 39L på uopdyrkede områder, mens der ved vandløb 38L er en mindre oversvømmelse på en lavtliggende mark.



Figur 60: Den maksimale udbredelse af vand på terræn ved kraftig tilledning af overløbsvand fra byerne Rødby og Holeby (markeret med blå) for en sommersituation.

For vintersituationen giver maksimum median afstrømningen alene anledning til vand på terræn på steder som i forvejen er vandlidende og ofte ikke dyrkede områder. (se figur 61)

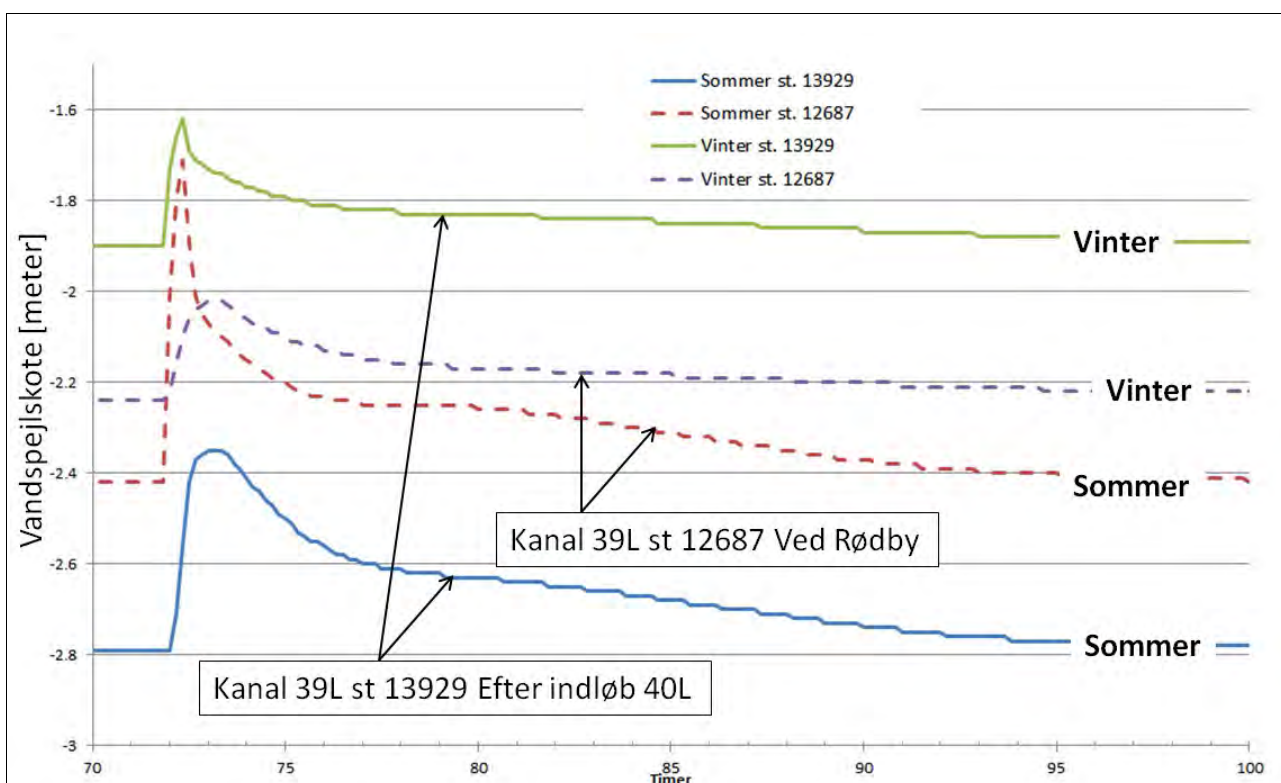


De beregnede udbredelser af vand på terræn i vintersituationen med en basis-afstrømning svarende til maksimum median afstrømning og kraftig bymæssig tilledning fra Rødby og Holeby er vist på figur 62 nedenfor. Der opstår få nye oversvømmede områder i forhold til basis-scenariet (figur 61). Efter sammenløb mellem vandløb 39L og 40L opstår der et mindre område på marken med oversvømmelse. Øvrige oversvømmede områder vokser moderat i forhold til basis-scenariet. I stor udstrækning opstår oversvømmelserne i områder, som ikke er dyrkede, fordi de er lavtliggende og vandlidende.



Figur 62: Udbredelse af vand på terræn i en vintersituation med afstrømning svarende til maksimum median afstrømning og kraftig tilledning fra byområderne Rødby og Holeby

I forhold til den skadevirkning, som en oversvømmelse fra de bymæssige områder giver anledning til, er det interessant at se på varigheden af oversvømmelsen. Den tidlige udvikling af vandstanden for 39L ved et tværsnit efter indløb fra 40L og for 39L 150m nedstrøms indløb fra bymæssig tilledning fra Rødby Nord er vist på figur 63 nedenfor. Det ses på figuren, at vandstandene hurtigt stiger og i løbet af 6 timer falder igen. Efter omkring 20 timer er vandstanden tilbage på startværdien.



Figur 63: Den tidlige udvikling af vandstande for sommer og vinter scenarierne med bymæssig tilledning for station på 39L efter indløb af 40L og på 39L 150 m nedstrøms bymæssig tilløb fra Rødby Nord. Brink koter er -0,7m og -0,1, for station 13.929 og station 12.687 henholdsvis.

Scenarieløserne med bymæssig tilledning af overløbsvand viser, at en ekstrem tilledning af byvand kan give kortvarige høje vandstande (6 – 20 timer) og oversvømmelser med begrænset udstrækning.

6.3 Udpumpning fra Hummingen

Sommerhusområdet Hummingen Strand har periodevis problemer med vandmættede forhold i haverne omkring sommerhusene og dermed våde og svuppene græsplæner. Problemerne skyldes utilstrækkelig dræning i området. Yderligere er der ved høje vandstande i Lilleholm kanal problemer med udledning af drænvandet til denne. For at imødegå dette planlægges det at etablere nyt drænsystem og øge afstrømningen fra området ved pumpning af drænvand via kommunevandløb 60 (KVL60) som udløber i Lilleholm Kanal (VL3). Det drænedede område udgør et areal på 135 ha. Det planlægges, at øge den specifikke afstrømningen fra 0,5 l/s/ha til 1,0 l/s/ha, hvilket svarer til en ændring af udledningen fra 67 l/s til 135 l/s.

For at undersøge konsekvenserne af en sådan øget tilledning til Lilleholm kanal i forhold til vandstande i denne er der lavet stationære modelberegninger med Rødby Fjord modellen for situationer, hvor den generelle afstrømning fra oplandet til Lilleholm Kanal svarer til maksimum median afstrømninger for henholdsvis vinter og sommer. Modelberegningerne viser, at den øgede tilstrømning fra Hummingen i disse situationer vil give en maksimal vandstandsstigning i Lilleholm Kanal på 9 cm og 4 cm for henholdsvis sommer- og vintersituation. I begge tilfælde stigninger som

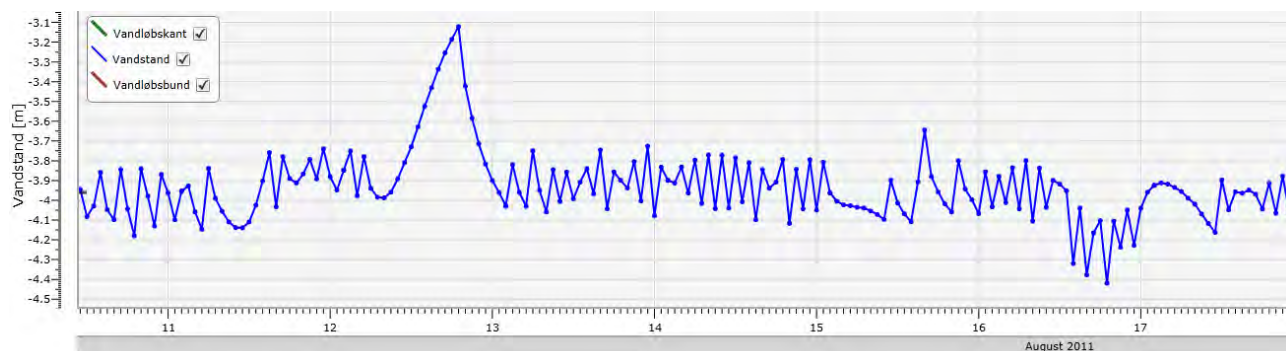
ikke giver anledning til oversvømmelse.

6.4 August 2011.

I dette afsnit vil vi gå lidt mere i dybden med enkelte elementer i forbindelse med hændelsen i august 2011.

6.4.1 Vandstand ved Kramnitse

Figur 64 viser den målte vandstand ved Kramnitse i august 2011. Hver gang pumpen startes, sænkes vandstanden.

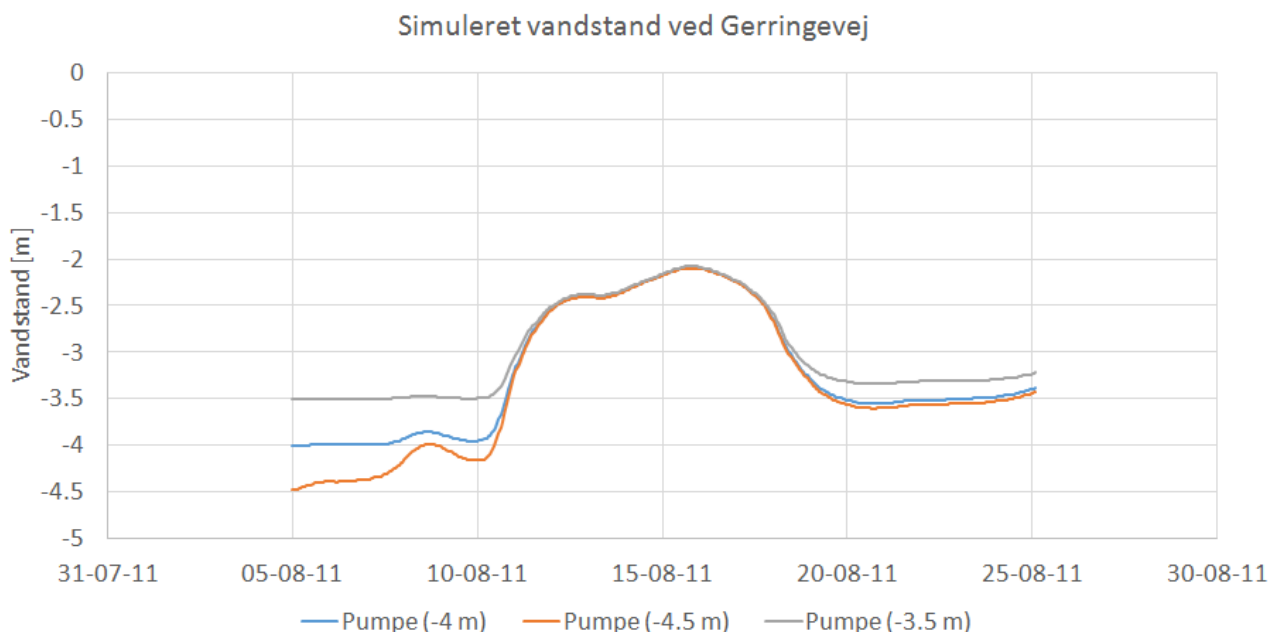


Figur 64: Målt vandstand ved Kramnitse i august 2011

Det skal bemærkes, at den 12. august stiger vandstanden til kote -3.1, hvilket må skyldes, at tilstrømningen i den periode var højere end, hvad pumpen kan klare. I vintersituationer er der observeret det samme mønster ved pumpen, og det har medført oversvømmelser i oplandet. Det tyder på, at øget grødeskæring ikke ville have været nok til at forhindre oversvømmelsen i august 2011, idet en tilsvarende afstrømning om vinteren, hvor der ikke er grøde, giver oversvømmelse. Det er muligt, at perioden med oversvømmelse kunne have været forkortet med grødeskæring, men hvis den skulle have været totalt forhindret ved eksempelvis at udvide kanalerne, skulle pumpen også have været kraftigere. Dette skal omvendt ikke forstås på den måde, at en kraftigere pumpe havde været nok til at undgå oversvømmelse.

For at undersøge om det kunne have hjulpet på oversvømmelserne, hvis pumpen ved Kramnitse havde holdt et lavere niveau i den kritiske periode, har vi foretaget en række simuleringer med HEC-RAS modellen, hvor vi har fastholdt vandstanden ved pumpen i forskellige niveauer. Påvirkningen på vandstanden ved Gerringevej er vist i figur 65 nedenfor.

I starten af perioden, inden det begyndte at regne, ses det, at vandstanden følger vandstanden ved pumpen. Idet regnen kommer, og afstrømningen stiger, ses dog ingen effekt længere. Det er således ikke muligt at påvirke oversvømmelser i oplandet ved at sænke vandstanden ved Kramnitse.



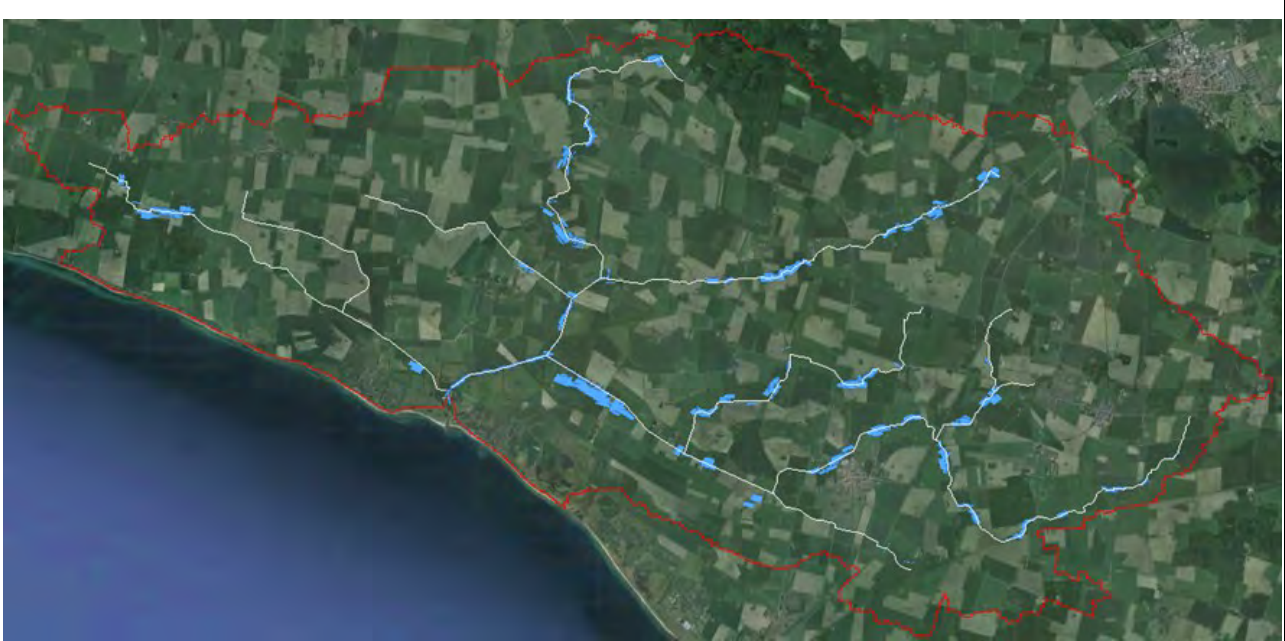
Figur 65: Simuleret vandstand ved Gerringevej i august 2011 med forskellige vandstande ved Kramnitse.

6.4.2 Grødeskæring

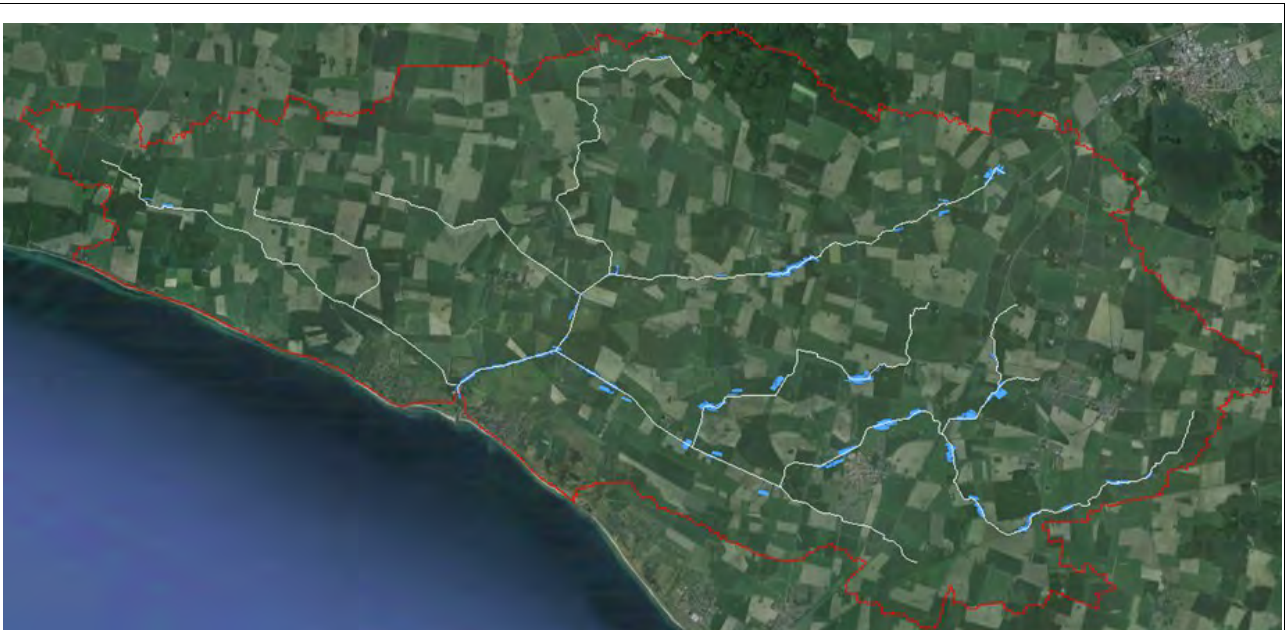
Oversvømmelsen i august 2011 fandt sted umiddelbart inden efterårsskæringen af grøde i vandløbene. Så vandløbene havde betydelig grødevækst da den langvarige regn faldt. Efter 2011 er der indført en ekstra grødeskæring af hovedvandløbene midt på sommeren. Et oplagt spørgsmål er hvor stor betydning den kraftige grødevækst havde for udbredelse af oversvømmelsen, og om oversvømmelsen kunne have været helt eller delvist undgået hvis man allerede inden 2011 havde indført den ekstra grødeskæring om sommeren.

For at undersøge dette er Rødby Fjord modellen anvendt til at simulere oversvømmelsens udbredelse, både for den grødevækst som var tilstede i august 2011 og for en situation med normal sommer grødevækst, svarende til at grøden skæres midt på sommeren.

Resultaterne fra simuleringerne er vist på figur 66 og 67 nedenfor. Den kraftige grødevækst giver anledning til større udbredelser af oversvømmelsesområder. Men som det ses af figur 67 ville oversvømmelsen ikke kunnet været helt udgået selvom der havde været foretaget sommergrødeskæring.



Figur 66: Simulerede udbredelser af oversvømmelse, med en afstrømning på 80 l/s/km², svarende til den maksimale afstrømning under august 2011 oversvømmelsen og med kraftig grødevækst.

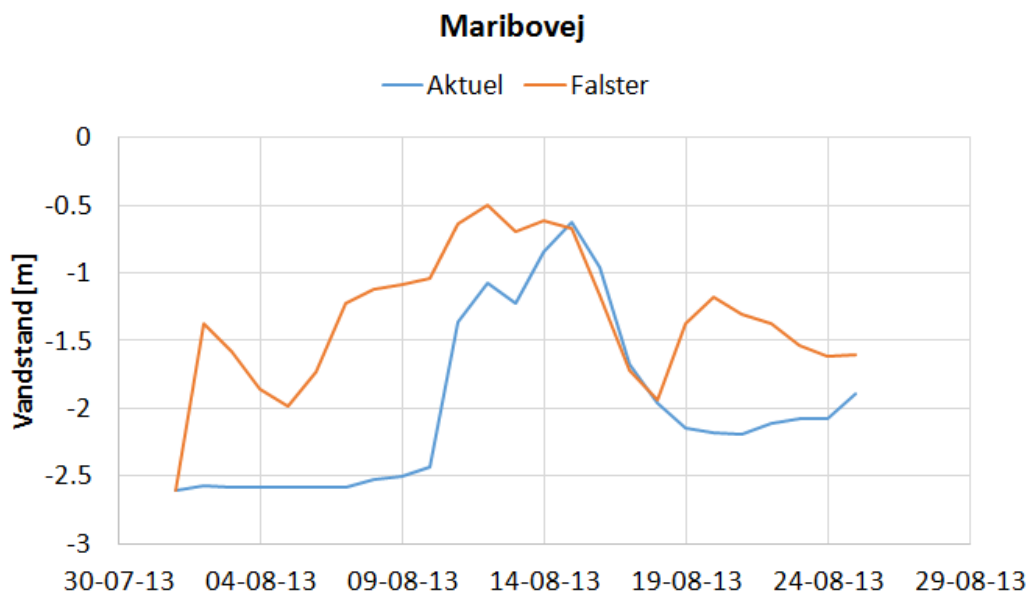


Figur 67: Simulerede udbredelser af oversvømmelse, med en afstrømning på 80 l/s/km², svarende til den maksimale afstrømning under august 2011 oversvømmelsen og med sommergrødeskæring.

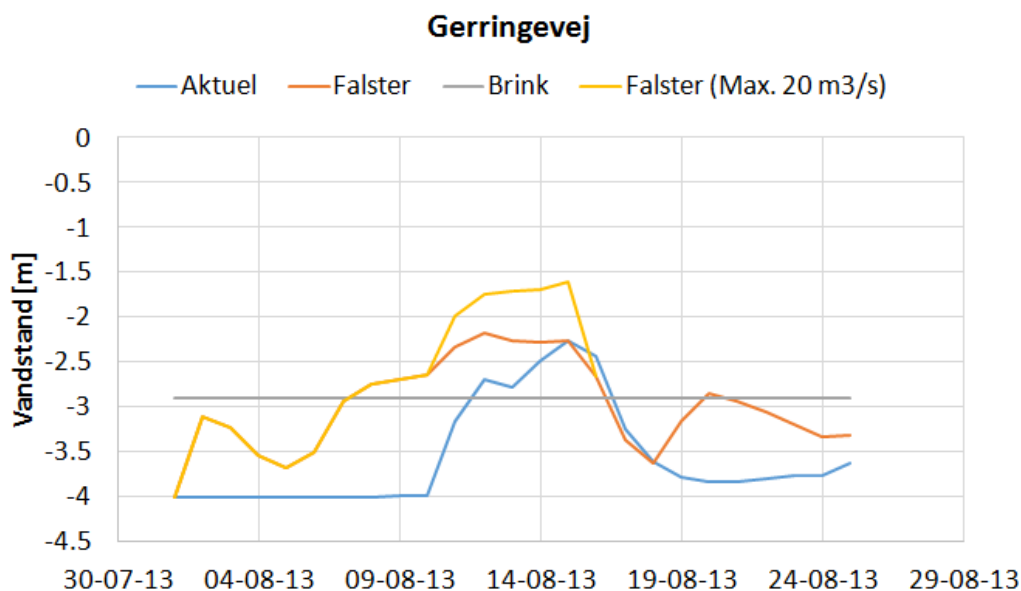
6.4.3 Falster

Selv om det regnede meget på Lolland i august 2011, regnede det faktisk endnu mere på Falster.

Ved Nakskov renseanlæg blev der målt 204 mm nedbør i august, mens der ved Nykøbing Falster renseanlæg blev målt 322 mm. Et spørgsmål fra interessent-gruppen har gået på, hvad der ville være sket, hvis det havde regnet lige så meget på Lolland. Det har vi belyst ved at køre modelsystemet med nedbøren fra Falster 2011. Figur 68 og 69 og sammenligner den simulerede vandstand ved Maribovej og Gerringevej for henholdsvis den aktuelle regn og regnen, som den var på Falster. I sidstnævnte tilfælde er der endvidere vist en kurve, hvor den maksimale udpumpning ved Kramnitse sættes til 20 m³/s. Det ses, at vandstanden bliver lidt højere, men det er mere udpræget, at perioden med høj vandstand bliver længere.



Figur 68: Beregnet vandstand ved Maribovej i august 2011 for aktuel regn og regn som på Falster



Figur 69: Beregnet vandstand ved Gerringevej i august 2011 for aktuel regn og regn som på Falster.

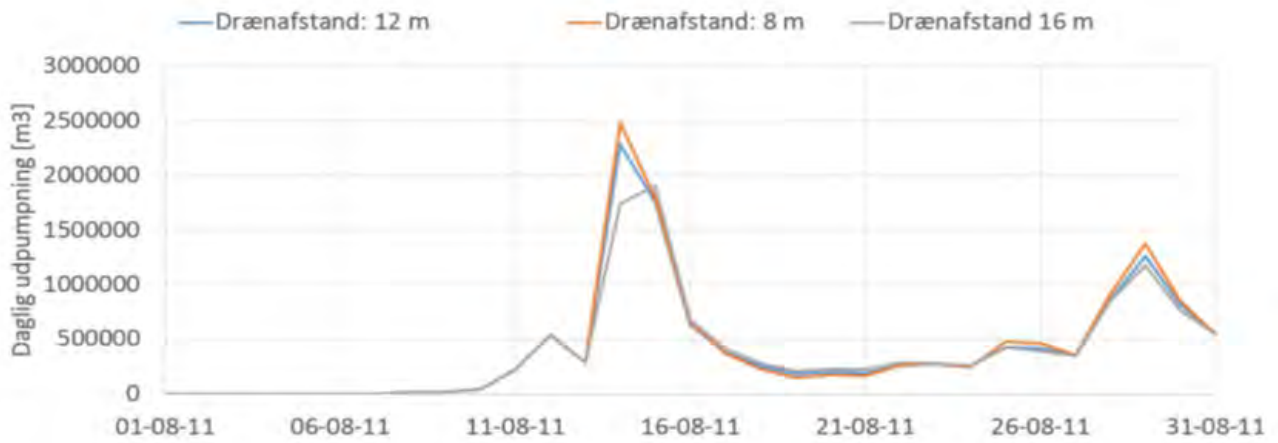
I det tilfælde, hvor udpumpningen begrænses bliver den maksimale vandstand ved Kramnitse ca. -2 m, hvor den i det rigtige tilfælde blev målt til -3.1. Oversvømmelsen vil således være større, men der er ikke tale om, at hele Kramnitse eller de nærliggende områder ville være blevet oversvømmet, da de ikke ligger under kote -2. I marts 2010 blev vandstanden ved Kramnitse målt til -2.5 m og det gav ikke anledning til problematiske oversvømmelser.

Selv om nedbøren var meget større på Falster, så giver det ikke en markant større oversvømmelse, men det giver en længere periode med oversvømmelse.

6.5 Effekt af ændret dræning

For at vurdere drænenes betydning for afstrømningen i oplandet har vi foretaget Daisy-simuleringer, med varierende afstand mellem drænene. Jo tættere drænene ligger, jo mere effektivt virker de. På Figur 70 har vi sammenlignet den simulerede afstrømning i august 2011 for de ændrede drænbeskrivelser. Det ses, at jo tættere drænene ligger, jo højere bliver den maksimale afstrømning. Den samlede vandbalance påvirkes kun i mindre grad.

Det skal dog siges, at det er en voldsom ændring, idet vi har ændret dræningen i hele oplandet på en gang. I praksis ville det tage rigtig mange år, så konklusionen må være, at den ændring i drænpraksis, der realistisk kan forventes, ikke vil få nævneværdig betydning.



Figur 70: Simuleret afstrømning (Daisy) for august 2011 ved forskellige afstande mellem drænene.

7 Klimascenarier

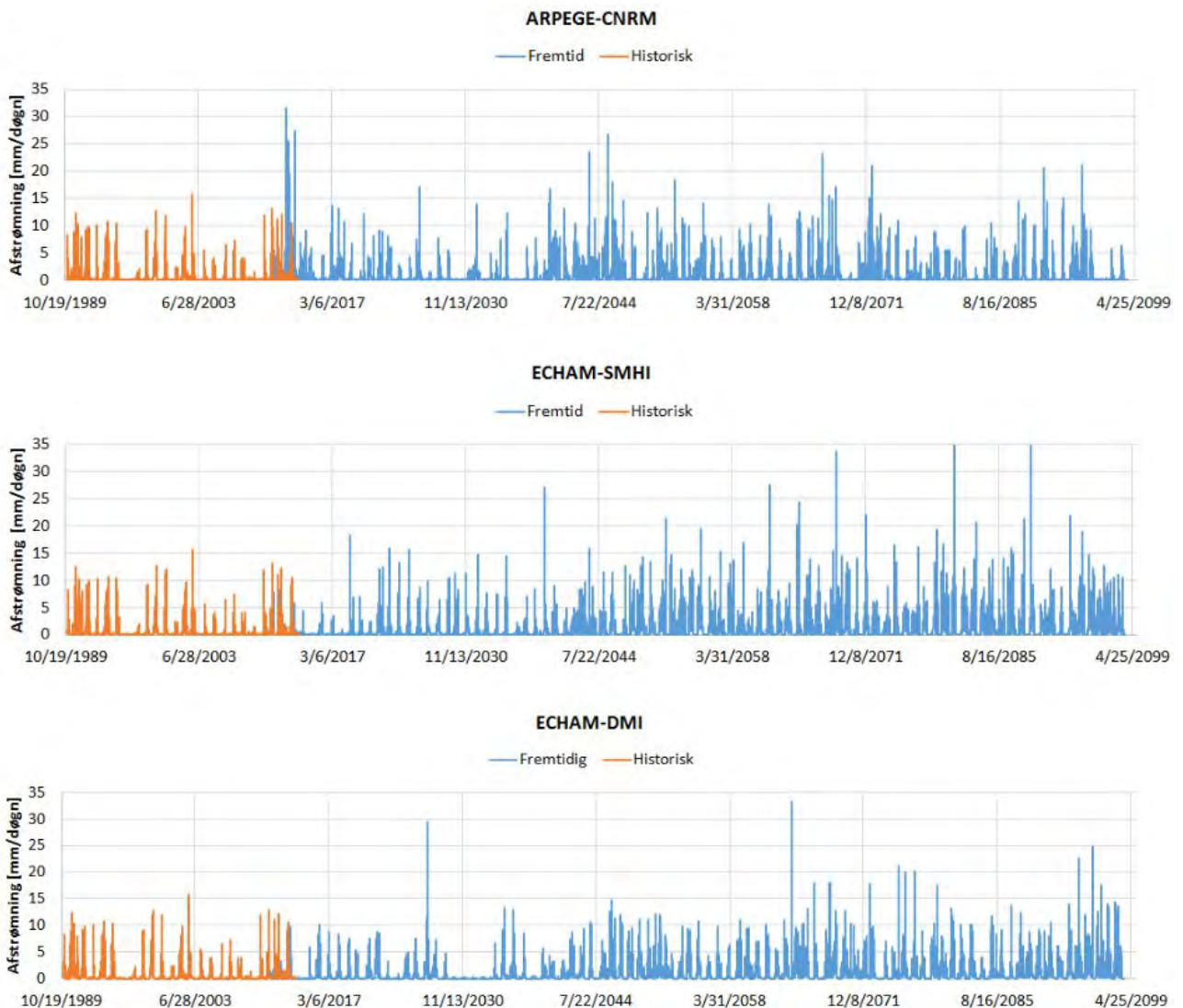
En del af projektets formål er som tidligere nævnt at vurdere, hvordan området vil reagere på de forventede klimaændringer. Der er bred enighed om, at temperaturen vil stige i fremtiden, men det er mindre klart, hvad der vil ske med nedbøren. Klimamodellerne giver ikke et entydigt billede, men der er en generel forventning om, at nedbøren i fremtiden bliver mere ekstrem med både flere tørre perioder og mere ekstremnedbør. Til design af spildevandssystemer anbefales det i dag at multiplicere den nuværende ekstremnedbør med en faktor mellem 1.2 og 1.4 (Arnbjerg 2008). Disse faktorer er fundet ved at sammenligne historiske nedbørsdata med data fra en klimamodel.

For Rødby Fjord er det mere komplekst, idet det ikke er en enkelt hændelse, der giver oversvømmelse, men en kombination af flere dages regn eller snesmeltning. Det er således nødvendigt med en klimafremskrevet nedbørstidsserie for at vurdere fremtidig risiko for oversvømmelse.

7.1 Klimafremskrivning

GEUS har i flere studier forsøgt at fremskrive klimaet, og har dannet klimatidsserier på baggrund af forskellige klimamodeller. I et studie har de benyttet disse data, sammen med den nationale grundvandsmodel til at screene for øget grundvandsstand og ændringer i ekstremvandføring for vandløb. I studiet havde de adgang til data fra 9 forskellige klimamodeller, hvoraf de udvalgte tre til at repræsentere henholdsvis en våd, tør og en median fremtidigt klima. Hvilken af modellerne, der bedst repræsenterer fremtiden, vides dog ikke.

Vi har fået adgang til disse 3 tidsserier med 100 års data på daglig tidsskridt og kørt Daisy-modellen. De beregnede afstrømninger vises på figur 71, sammen med den simulerede for den aktuelle nedbør, således at der er et sammenligningsgrundlag.



Figur 71: Simuleret daglig afstrømning for historiske data samt tre forskellige klimamodeller. Umiddelbart ser det ud som om, toppene er en smule højere i det fremtidige klima, og at de muligvis ligger lidt tættere hen mod slutningen af perioden. For at kunne sammenligne outputtet fra modellerne har vi lavet en ekstremværdianalyse på de først 30 års data, og derefter beregnet en klimafaktor ud fra 20 års-hændelserne. Det er den samme metode, som GEUS har benyttet bortset fra, at vi har anvendt en Log-Pearson3-fordeling, hvor de har anvendt en Gumbel-fordeling i ekstremværdianalysen, og vi har opdelt i en sommer- og en vinter-situation. Resultaterne fra de tre klimamodeller er vist i nedenstående tabel.

	ARPEGE-CNRM	ECHAM-SMHI	ECHAM-DMI
Sommer	2.5	0.9	1.6
Vinter	1.2	1.2	1.4
GEUS	0.7	1.1	2
Gentagelsesperiode i fremtidigt klima August 2011 (år)	7	25	10

En klimafaktor under 1 betyder, at de maksimale vandføringer i fremtiden vil kunne forventes at være lavere, mens en klimafaktor over 1 betyder større maksimale vandføringer. For sommerperioden spænder vores faktorer fra 0.9 til 2.5 og for vinterperioden fra 1.2 til 1.4. Vi har ikke information, der gør os i stand til at vægte klimamodellerne, således at vi kan sige, om de har samme sandsynlighed.

8 Serviceniveau

Inden for dimensionering af afløbssystemer har man gennem mange år arbejdet med et koncept, som anvender begrebet serviceniveau. Konceptet tager udgangspunkt i at definere kritiske hændelser. En kritisk hændelse kan f.eks. være en situation med kraftig nedbør, hvor afløbssystemet ikke formår at bortlede vandet, og der derfor opstår områder med blankt vand på terræn. Et andet eksempel kan være en hændelse, hvor der sker overløb af kloakvand til et vandløb.

Serviceniveauet er den gennemsnitlige statistiske gentagelsesperiode for kritiske hændelser. F.eks. kan der politisk tages beslutning om, at afløbssystemet skal indrettes således, at kraftige regnhændelser ikke giver anledning til vand på terræn oftere end hvert andet år, og at der ikke må være overløb fra kloak til vandløb oftere end hver femte år.

Bestemmelse af, hvilket serviceniveau man vil opnå, sker ved at holde omkostningerne til etablering, vedligeholdelse og renovering af afløbssystemet op mod de ulemper, som de kritiske hændelser giver anledning til i form af økonomisk tab og personlig ulempe for de berørte borgere.

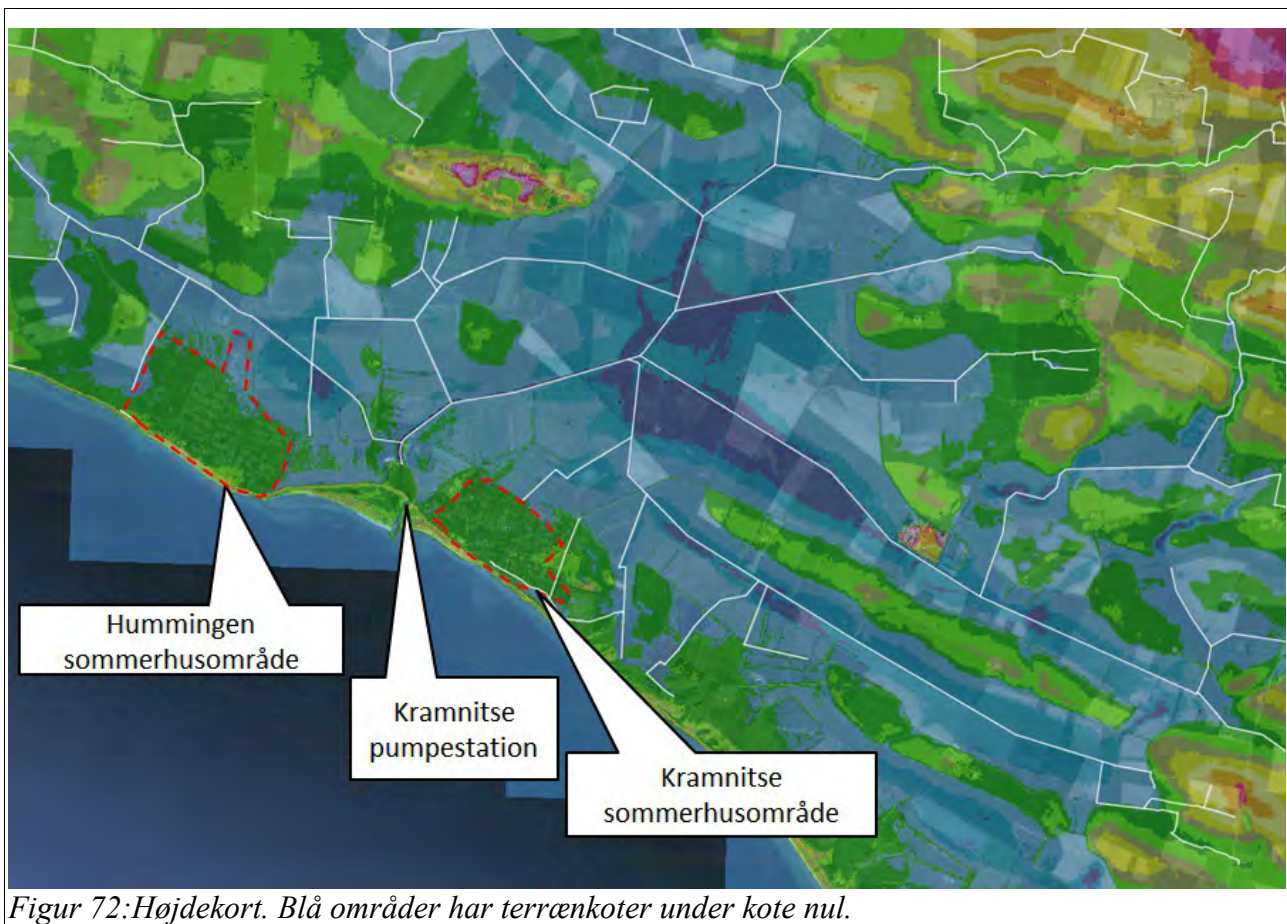
Som noget nyt har vi i nærværende projekt adapteret serviceniveau-konceptet til vandløbssystemet. Det indebærer blandt andet at definere kritiske hændelser for Rødby fjord systemet, estimere forventede gentagelsesperioder for sådanne hændelser og vurdere, hvilke tiltag der vil kunne bidrage til at hæve serviceniveauet – altså øge den forventede periode mellem kritiske hændelser.

8.1 Kritiske hændelser

Interessent-gruppen, bestående af repræsentanter fra Lolland Kommune, sommerhusejere, landbruget og pumpelaget har i samarbejde med rådgiver defineret følgende kritiske hændelser.

1. Vand på terræn på landbrugsjord i vækstsæsonen i en periode længere end tre dage.
2. Vand på terræn ved sommerhuse i mere end 10 dage
3. Vandstande i vandløb over drænniveau (ikke udløbskoter, men i forhold til dybde af dræn i markerne). Der er ikke nogen varighed her. I Børgesen et al. (2012) opsummeres de eksisterende undersøgelser om netop effekten af vand over drænniveau, og det konkluderes, at vi ikke med den nuværende viden kan komme med kvantitative mål.

Kritisk hændelse 2 (vand på terræn ved sommerhuse) er ikke medtaget i analysen af serviceniveau. Det begrundes med, at Hummingen og Kramnitse sommerhusområder ligger med terrænkoter omkring kote nul, og en oversvømmelse direkte fra kanalerne kun kan ske i en situation, hvor hele den gamle fjord er oversvømmet, hvilket er et scenarie vi ikke kommer i nærheden af hverken med nuværende klima eller fremtidigt klima (se figur 72). Der kan dog stadig opstå situationer med vand på terræn ved sommerhusområderne, som konsekvens af, at nedbøren ikke kan drænes til kanalerne. Der er et igangværende projekt, hvor der planlægges en løsning med en kombination med bedre dræning og en drænpumpe, som kan løfte drænvandet op i Lilleholm kanal. Dermed løses problemet lokalt. Problematikken omkring sommerhusområderne er dermed afkoblet fra den generelle problematik omkring Rødby Fjord.

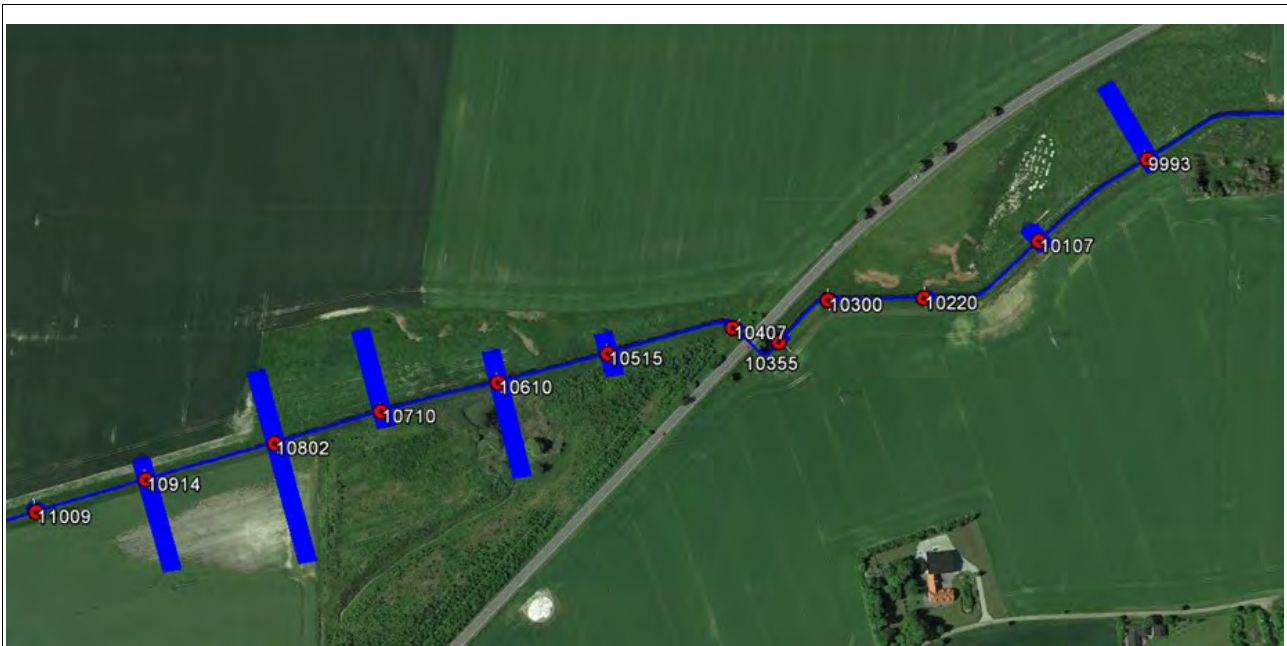


8.2 Rødby fjord systemets nuværende kapacitet

Rødby fjord modellen er anvendt til at estimere den afstrømning, som giver anledning til kritiske situationer i forhold til oversvømmelse af landbrugsområder og vandstande over drænkoter.

Under anvendelse af Rødby Fjord modellen er afstrømningen gradvist øget, indtil der optræder vand på terræn. Med en sådan gradvis øgning af afstrømningen ses, at oversvømmelse først finder sted i nogle områder og så breder sig til flere og større områder i takt med, at afstrømningen vokser.

Modellens resultater viser, at de første områder, der oversvømmes, er områder langs vandløbene, som man ud fra luftfoto kan se er udlagt som brak eller skov. Altså, områder som man har valgt ikke at dyrke. Et eksempel fra vandløb 39L på en strækning nordøst for Rødby på dette er vist på figur 73 nedenfor. De blå linjer viser den beregnede vandspejlsbredde i vandløbstværsnittene for en sommersituation med normal grøde og en afstrømning på 40 l/s/km². Vandspejlet udbreder sig i skov og brak-områder. Dog viser eksemplet også, at der vil være høje vandstande ved station 10914, hvor der er opdyrket. Det er tydeligt fra figuren, at netop der er der dårlig plantevækst, hvilket indikerer, at dette område er meget udsat for oversvømmelse eller dårlig dræning.

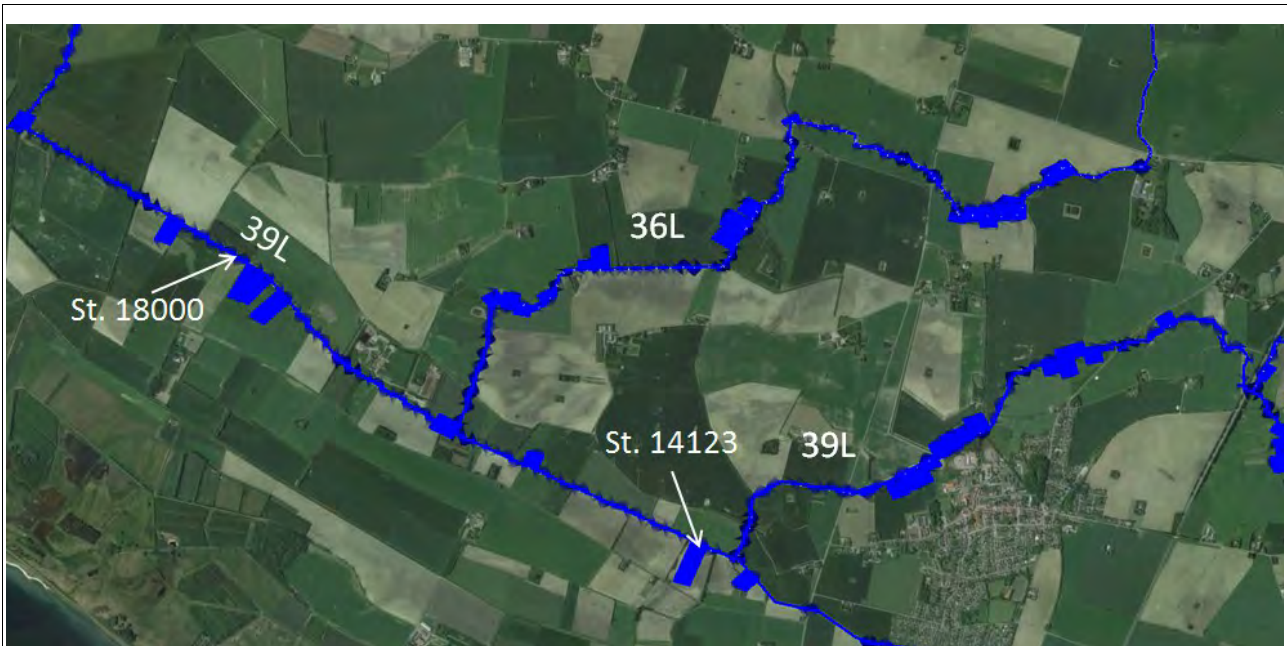


Figur 73: Modelberegning af vandspejlets udbredelse ved en sommersituation med normal grødevækst og en afstrømning på 40 l/s/km². Vandløb 39L nordøst for Rødby.

Det er først ved en vandføring på 65 l/s/km², der opstår oversvømmelse af større landbrugsområder.

Særlig kritisk er området langs Rødby kanal (39L) omkring 300 m øst for hvor vejen Langelinie krydser kanalen (st. 18.280m) (se figur 74), hvilket også er oplandets lavest beliggende område. Kriteriet for kritiske situationer i forhold til vand på terræn er derfor defineret som en situation, hvor modellen tydeligt viser, at der er vand på terræn netop der. For vækstperioden, hvor der i modellen indregnes større modstand fra grødevækst, opstår der kritiske forhold altså når afstrømningsraten overstiger 65 l/s/km².

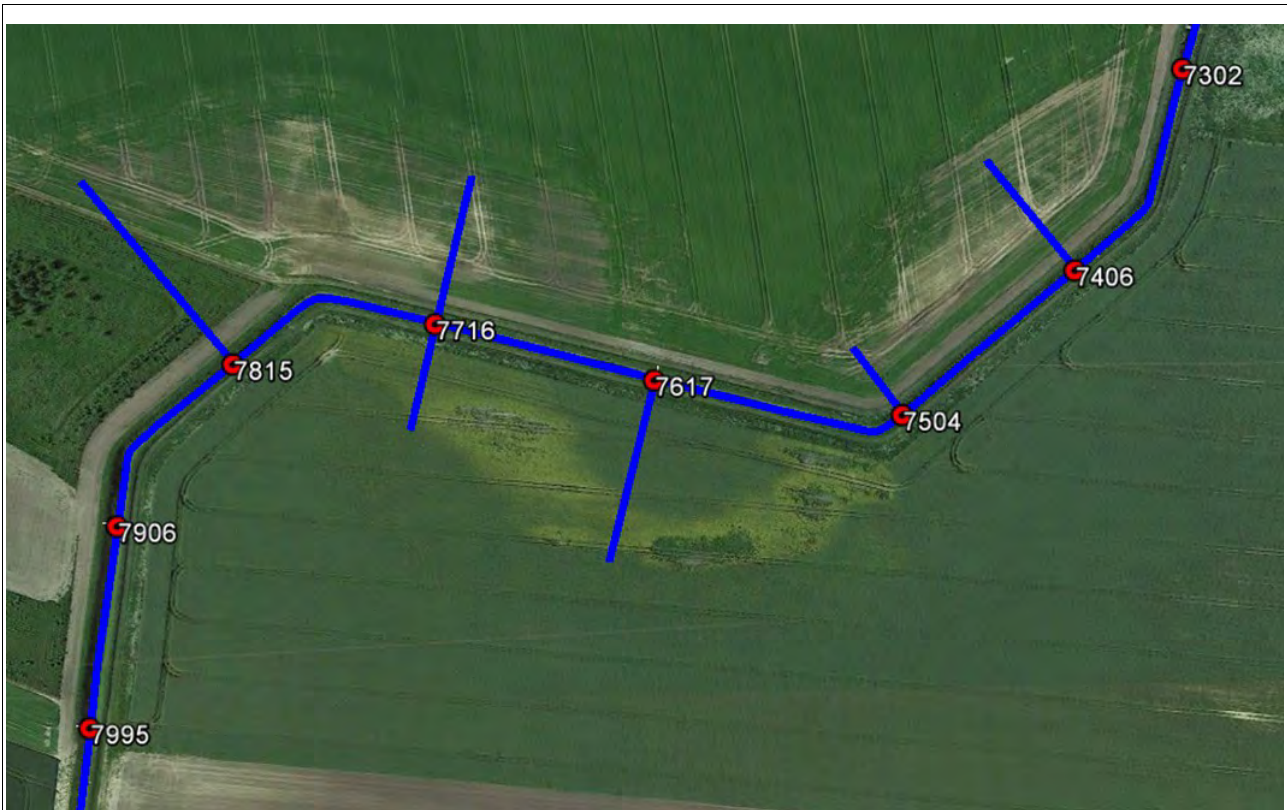
En tilsvarende analyse er foretaget med gradvis stigende afstrømning for vinter, hvor der ikke er grødevækst. Her viser analysen, at der opstår kritiske forhold, når afstrømningen overstiger 80 l/s/km².



Figur74: Udbredelse af oversvømmelse ved en sommer situation med afstrømning på 65 l/s/km².

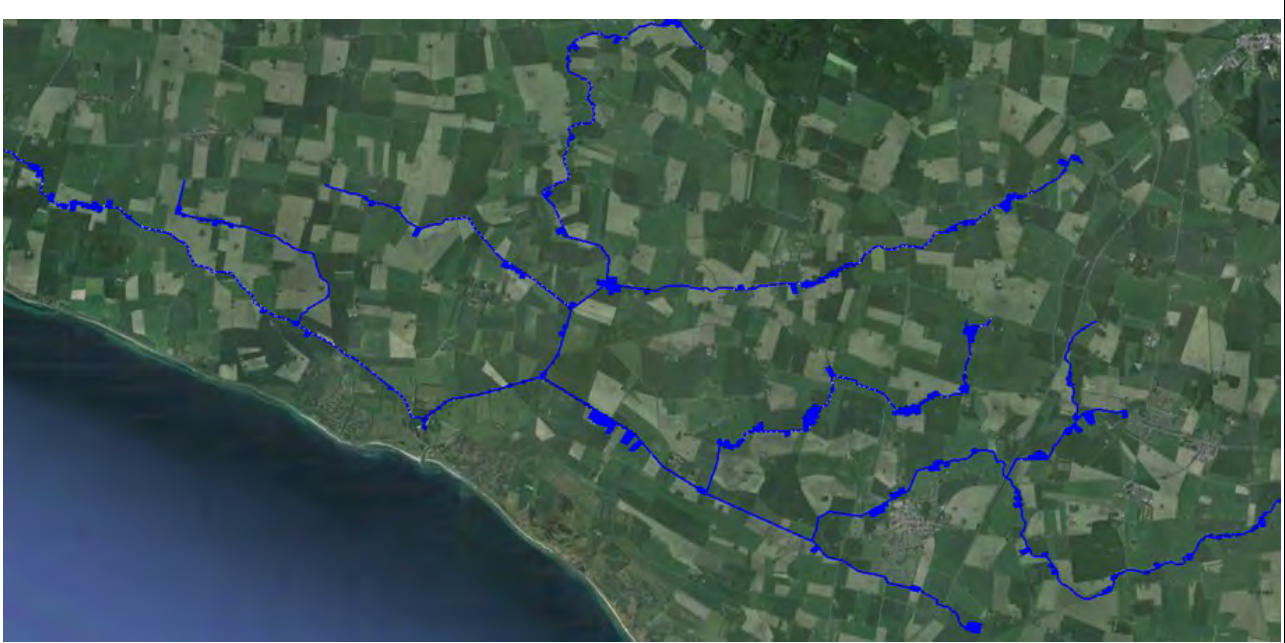
Samme øvelse er udført i forhold til vandstande i kanaler over drænniveau. Det anslås, at dræn typisk ligger 110 cm under terræn. I analysen vurderes, hvilke områder langs kanalerne der vil have terrænkoter, som ligger under simuleret vandstandskote i nærmeste kanal plus 110 cm.

Analysen viser, at der findes en række områder langs kanalerne, som selv ved meget små vandføringer (2 l/s/km²) vil have terrænkoter, som ikke ligger over 110 cm over vandspejlsniveau i nærmeste kanal. De fleste af disse områder er udlagt som brak eller skov, men der er også landbrugsområder imellem. Et eksempel på dette fra vandløb 36L er vist på figur 75 nedenfor. Det ses af figuren, at der er tydelig mindre plantevækst på de område, hvor modellen viser, at der er problemer med afdræning.



Figur 75: Simulerede udbredelse af områder hvor afstanden fra vandspejlskote til terræn er mindre end drændybden (110 cm). Eksemplet er fra vandløb 36L

Egentlige større områder med problemer med afdræning om sommeren opstår ved en vandføring på 10 l/s/km^2 . Igen er det området omkring Rødby Kanal (30L) st. 18.280m, hvor der først opstår kritiske situationer (se figur 76). Ved samme afstrømning opstår der yderligere problemer med dræn allerøvers i kanalerne. For vækstperioden estimeres derfor, at afstrømninger over 10 l/s/km^2 giver vandstande i vandløbene, hvor der pletvist er problemer med afdræning.



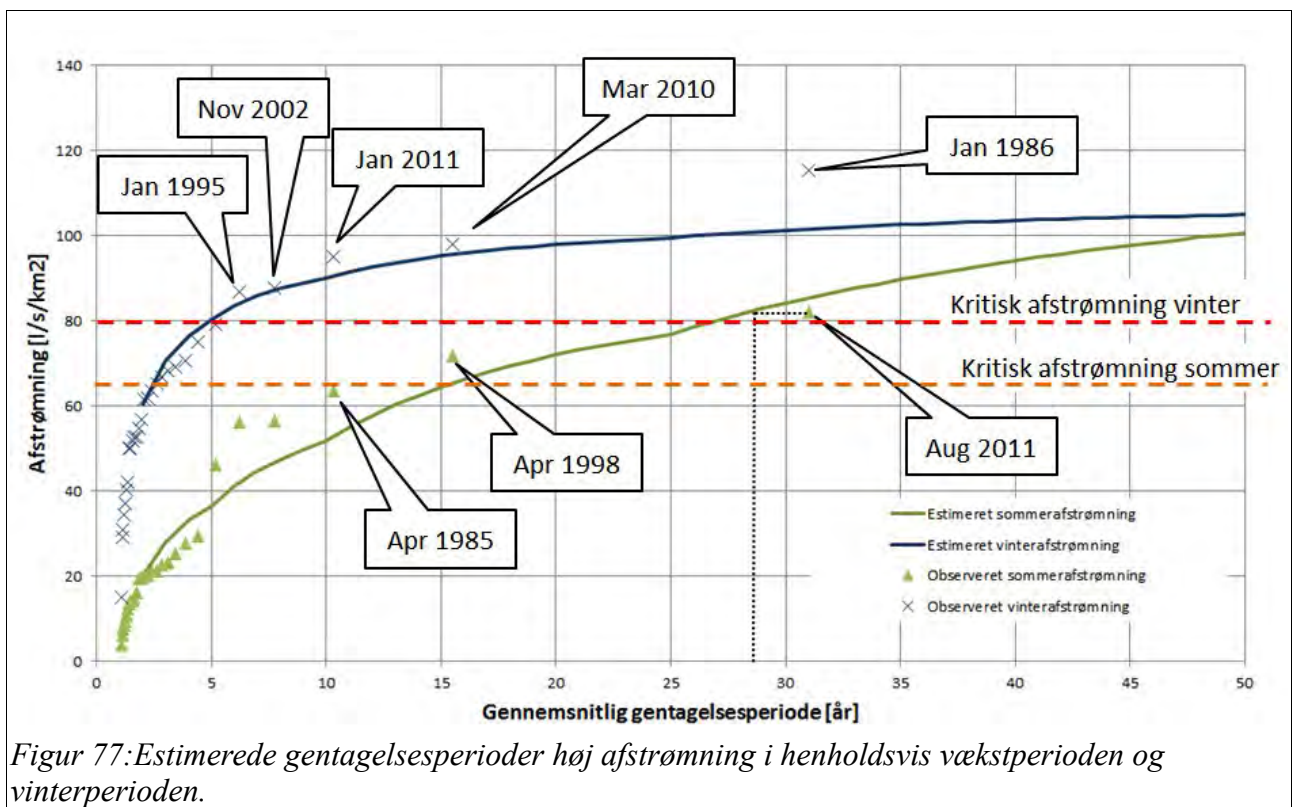
Figur 76: Beregnede udbredelser af områder hvor terrænkoter ligger mindre end 110 cm over vandspejlskoter i en sommersituation med en afstrømning på 10 l/s/km². Altså områder hvor der kan være problemer med afdræning.

8.3 Gentagelsesperioder og nuværende serviceniveau

Der er registreret daglige udpumpningsmængder for Kramnitse pumpestation fra 1984 og frem til i dag. Denne tidsserie er anvendt til at estimere gentagelsesperioder for ekstreme afstrømninger. Til analysen er Log-Pearson3 metoden anvendt.

Der skelnes mellem vækstperioden, som løber fra og med april til og med september og vinterperioden, som er de resterende måneder i året. I vækstperioden er både den gennemsnitlige afstrømning og den maksimale afstrømning lavere end de tilsvarende afstrømninger i vinterperioden. Til gengæld har vandløb og kanaler højere hydraulisk modstand i vækstperioden i forhold til vinterperioden på grund af grødevækst. Yderligere er konsekvensen af oversvømmelse større i vækstperioden i forhold til vinterperioden, idet oversvømmelser her i højere grad giver anledning til tab i afgrødeproduktionen.

Log-Pearson3 analysen baserer sig på årlige maksimum værdier. Dermed reduceres den lange udpumpningsserie til 30 maksimumsværdier for henholdsvis vækstperioden og vinterperioden. Ved bestemmelsen af de årlige maksimumsværdier er der anvendt vandår og ikke kalenderår. Vandåret løber fra slutningen af vækstperioden og et år frem. Dermed sikres det, at der fra hver vinterperiode kun indgår en maksimumsværdi. Alle værdier bliver dermed statistisk uafhængige, hvilket er en forudsætning for den anvendte metode til bestemmelse af ekstremværdier og gentagelsesperioder.



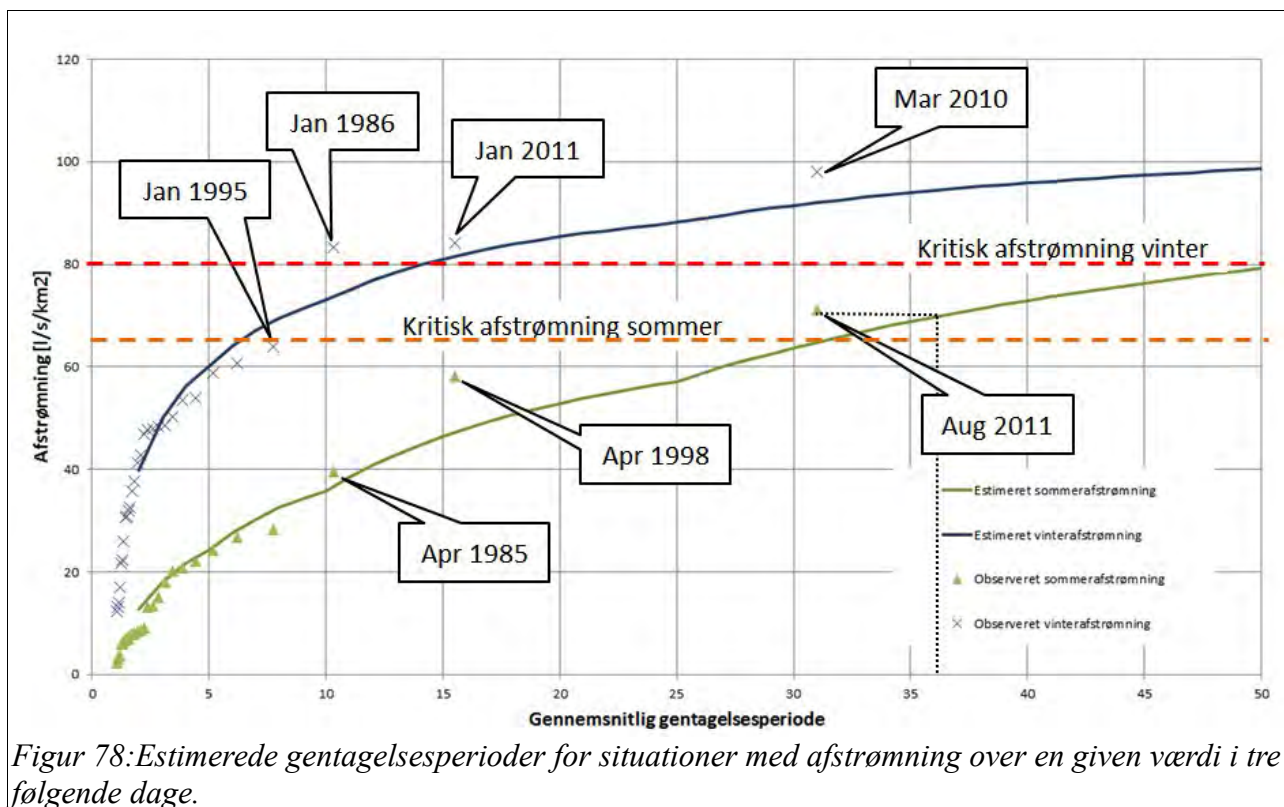
Resultatet fra Log-Pearson3 analysen er vist på figur 77 ovenfor. De fuldt optrukne linjer viser sammenhængen mellem estimerede afstrømninger og tilhørende gentagelsesperioder for henholdsvis vækstperioden og vinterperioden. Kurverne bestemmes således, at Log-Pearson3 fordelingen har samme statistiske parametre som de observerede hændelser (momentmetoden). Trekkanterne og krydsene viser de observerede udpumpningsmængder omsat til afstrømningsrater. De kritiske afstrømningsrater, som giver anledning til vand på terræn i henholdsvis vækstperioden og vinterperioden (se forrige afsnit) er vist med de stiplede linjer.

August 2011 afstrømningen, som gav anledning til oversvømmelser i Rørby Fjord kan jævnføre figuren kategoriseres som en 27 års hændelse. Altså en meget usædvanlig hændelse.

Hvis vi kikker på de kritiske afstrømninger (de stiplede linjer), kan det af figuren aflæses, at der i vækstperioden vil opstå vand på terræn i gennemsnit hvert 15. år, mens situationer med vand på terræn vil opstå i gennemsnit hvert 5. år om vinteren.

Som nævnt tidligere var et af kriterierne for en kritisk hændelse, at varigheden af vand på terræn på landbrugsområder var tre eller flere følgende dage i vækstperioden. For at undersøge den forventede hyppighed for sådanne hændelser er udpumpningsserien analyseret ved gennem hele tidsserien, at udtage alle tredages perioder (tre på hinanden følgende dage) og finde den mindste udpumpningsrate for hver periode. På baggrund af denne serie er de årlige maksimale værdier for vækstperioden og vinterperioden udtaget og anvendt som grundlag for en Log-Pearson3 ekstremværdianalyse.

På den måde fås et estimat af gentagelsesperioden for hændelser, hvor afstrømningen har været over en given værdi i tre følgende dage. Resultatet af analysen er vist på figur 78 nedenfor.

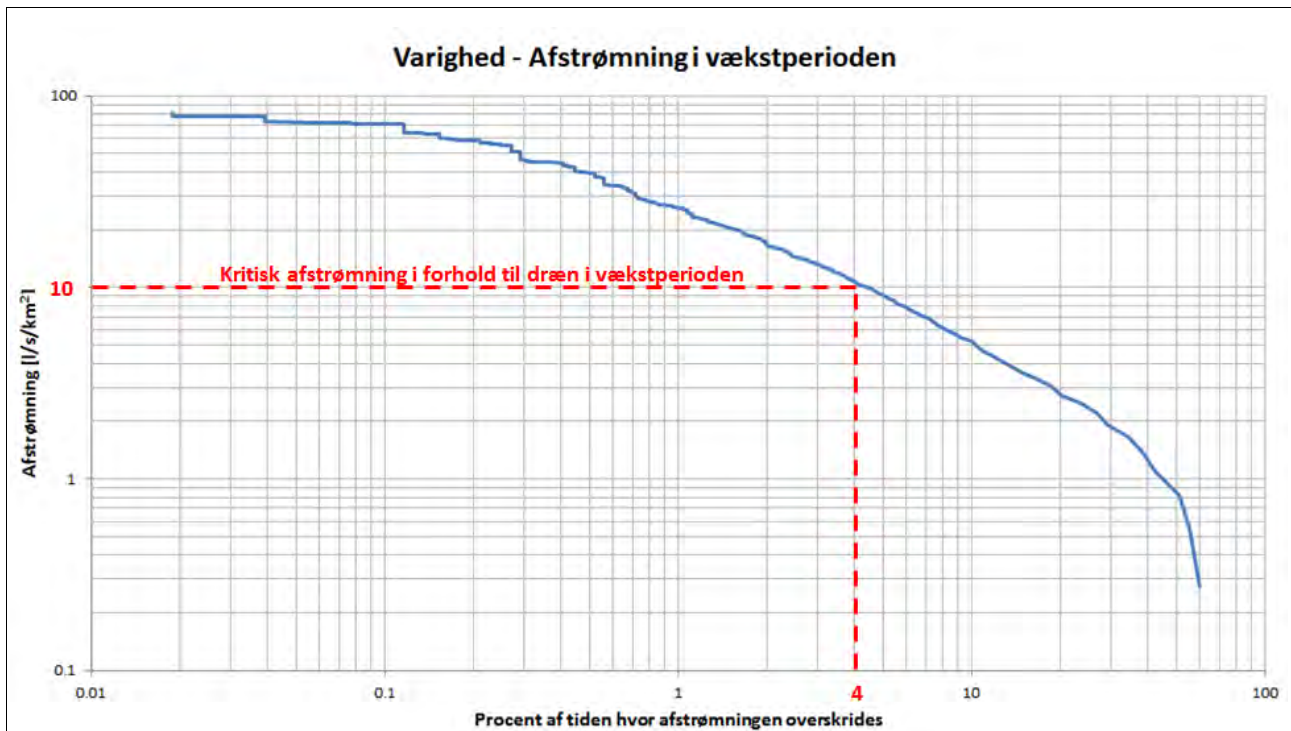


August 2011 hændelsen er stadig den mest ekstreme hændelse i vækstperioden, men kriteriet med at der skal være høj vandføring i mere en tre dage betyder, at den statistisk estimerede gentagelsesperiode nu bliver omkring 37 år – altså en endnu mere usædvanlig hændelse.

Hvis vi kikker på de stiplede linjer, som angiver de afstrømningsrater, der giver anledning til vand på terræn i henholdsvis vækstperioden og vinterperioden, kan vi aflæse, at vand på terræn i mere end 3 dage vil opstå i gennemsnit hvert 32. år i vækstperioden og hvert 14. år i vinterperioden.

Analysen er lavet for oversvømmelser, hvor det er vandstanden i kanalerne, som skaber oversvømmelserne. Eller med andre ord, de estimerede gentagelsesperioder dækker ikke situationer hvor der er blankt vand på marker uden, at der er høj vandstand i nærmeste kanal. Altså situationer, hvor dårlig dræning eller frosset jord forhindrer vandet i at dræne væk.

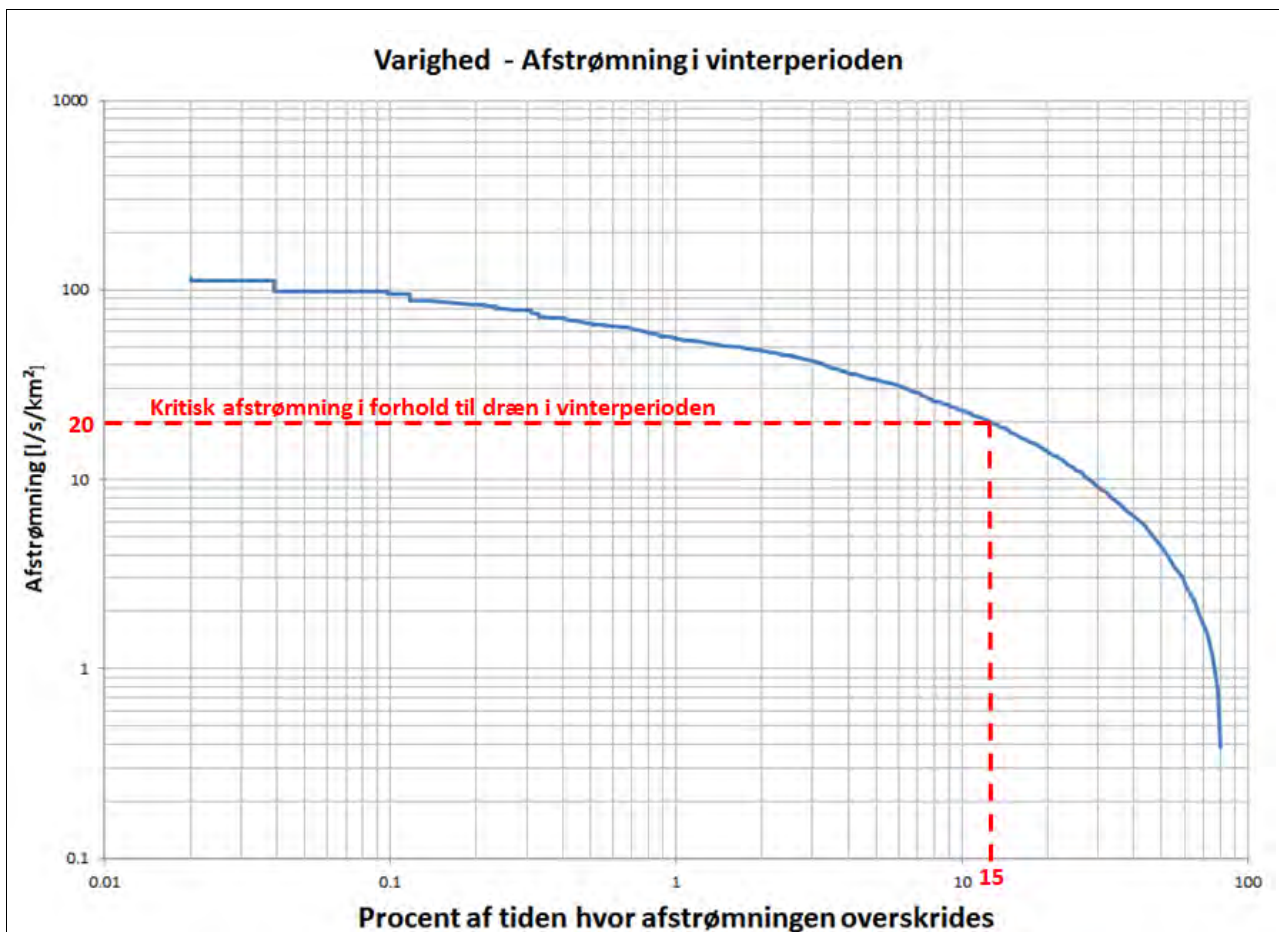
I forhold til problemer med dræning ved høje vandstande i kanalerne er det relevant at se på det samlede antal dage, hvor der i henholdsvis vækstperioden og vinterperioden er vandstande over drænniveau. Dette er analyseret ved at optegne varighedskurver for henholdsvis vækstperioden og vinterperioden baseret på daglige afstrømninger fra pumpetidsserien. Den blå linje på figur 79 nedenfor viser, hvor stor en andel af dagene i vækstperioden en given afstrømningsrate overskrides.



Figur 79: Varighedskurve for vækstperioden baseret på daglige afstrømninger beregnet ud fra 30 år udpumpningsrater fra Kramnitse pumpestation.

Som tidligere nævnt er der med Rødby Fjord modellen estimeret, at der vil være kritiske situationer i forhold til afdræning i vækstperioden, når afstrømningsraten overskrider 10 l/s/km². Dette er vist med den røde stiplede linje på figur 79. Det ses, at der i løbet af sidste 30 år har været afstrømninger på over 10 l/s/km² i 4% af tiden i vækstperioden. Eller man kan sige, at der i gennemsnit har været 7 dage i vækstperioden, hvor der har været afstrømninger over 10 l/s/km², hvilke potentielt kan give anledning til problemer i forhold til dræn.

Samme analyse er lavet i forhold til vinterperioden, hvor den kritiske afstrømning er estimeret til 20 l/s/km². Her ses det, at der i 15% af tiden (27 dage) i gennemsnit i vinterperioderne har været afstrømning, som potentielt kan give anledning til problemer i forhold til afdræning.



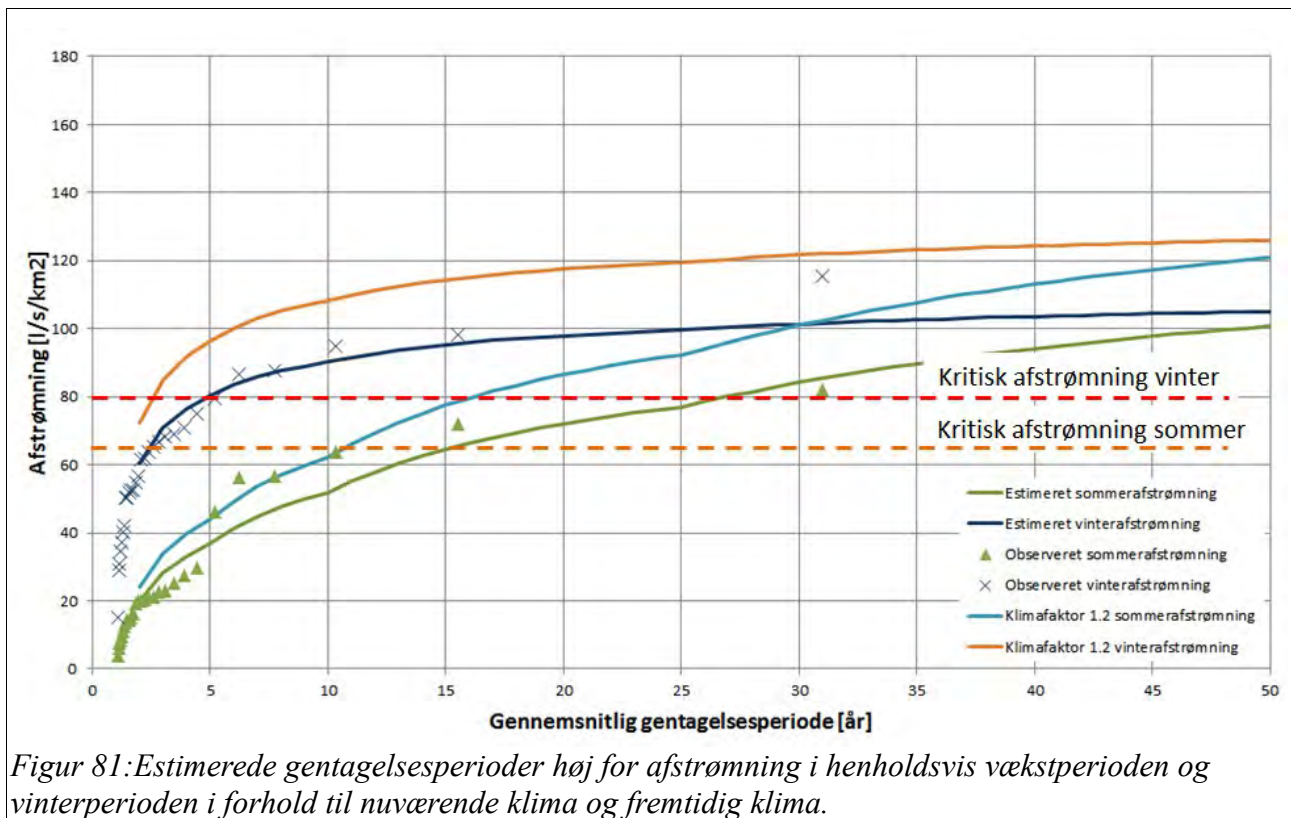
Figur 80: Varighedskurve for vinterperioden baseret på daglige afstrømninger beregnet ud fra 30 år udpumpningsrater fra Kramnitse pumpestation.

Ovenstående analyse omhandler de områder, som ligger i nærheden af hovedkanaler (kanaler som er vist på figur 2). Analysen giver et generelt billede af påvirkningen fra vandstandene i kanalerne på markdræn. Det betyder, at der kan være områder, hvor der opleves problemer med dræning med større hyppighed, fordi de ligger lavt og langt fra hovedkanalerne eller ikke har et velfungerende drænsystem. Endelig kan helt lokale jordbundsforhold også have indflydelse på drænforholdene.

8.4 Klimaændringer

I afsnit 7 viste vi forskellige bud på, hvordan det fremtidige klima kan komme til at se ud, og vi udledte forskellige klimafaktorer. I dette afsnit viser vi hvordan en sådan klimafaktor vil påvirke analysen af serviceniveauet. Vi benytter en klimafaktor på 1,2, svarende til, at ekstremafstrømningen stiger med 20 %.

Analysen er lavet på samme måde som tidligere blot med den ændring, at alle årsmaksima er ganget med 1.2. Resultatet af analysen er vist på figur 81 nedenfor.

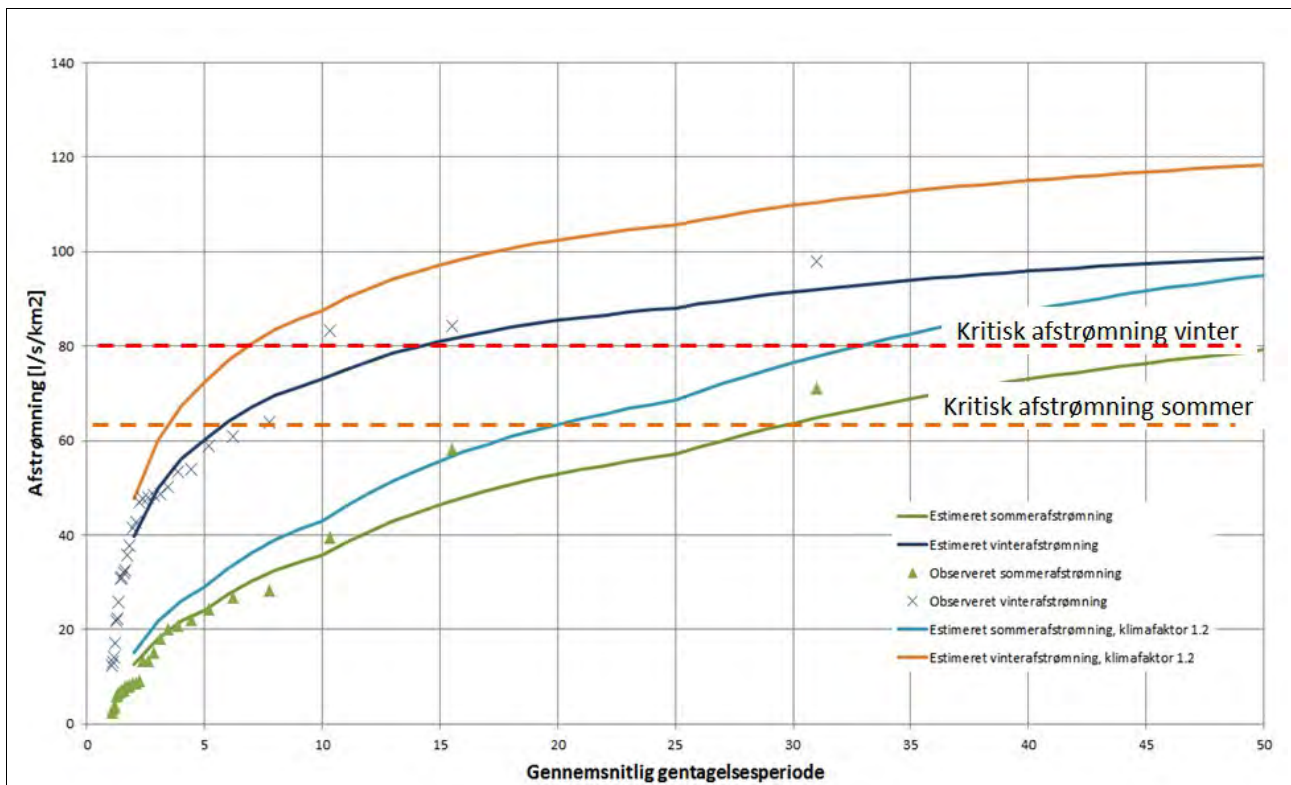


Figur 81: Estimerede gentagelsesperioder høj for afstrømning i henholdsvis vækstperioden og vinterperioden i forhold til nuværende klima og fremtidig klima.

Ved aflæsning af gentagelsesperioder for kritiske afstrømninger for vækstperioden og vinterperioden fås for fremtidig klima en gentagelsesperioder på henholdsvis 11 og 3 år. Altså hyppigere oversvømmelser end gentagelsesperioderne på 15 og 5 år, som vi fik for nuværende klima.

Analysen i forhold til 3-dages oversvømmelser er ligeledes gentaget, hvor der er anvendt en klimafaktor på 1,2. Resultatet af denne analyse fremgår af figur 82 nedenfor.

Ved aflæsning af gentagelsesperioder for kritiske afstrømninger for vækstperioden og vinterperioden fås for fremtidig klima en gentagelsesperioder på henholdsvis 20 og 7 år. Altså hyppigere oversvømmelser end gentagelsesperioderne på 32 og 14 år, som vi fik for nuværende klima.



Figur 82: Estimerede gentagelsesperioder for situationer med afstrømning over en given værdi i tre følgende dage, for nuværende forhold og med klimafaktor 1,2.

Nøgleværdier for analyserne er opsummeret i tabel 7 nedenfor.

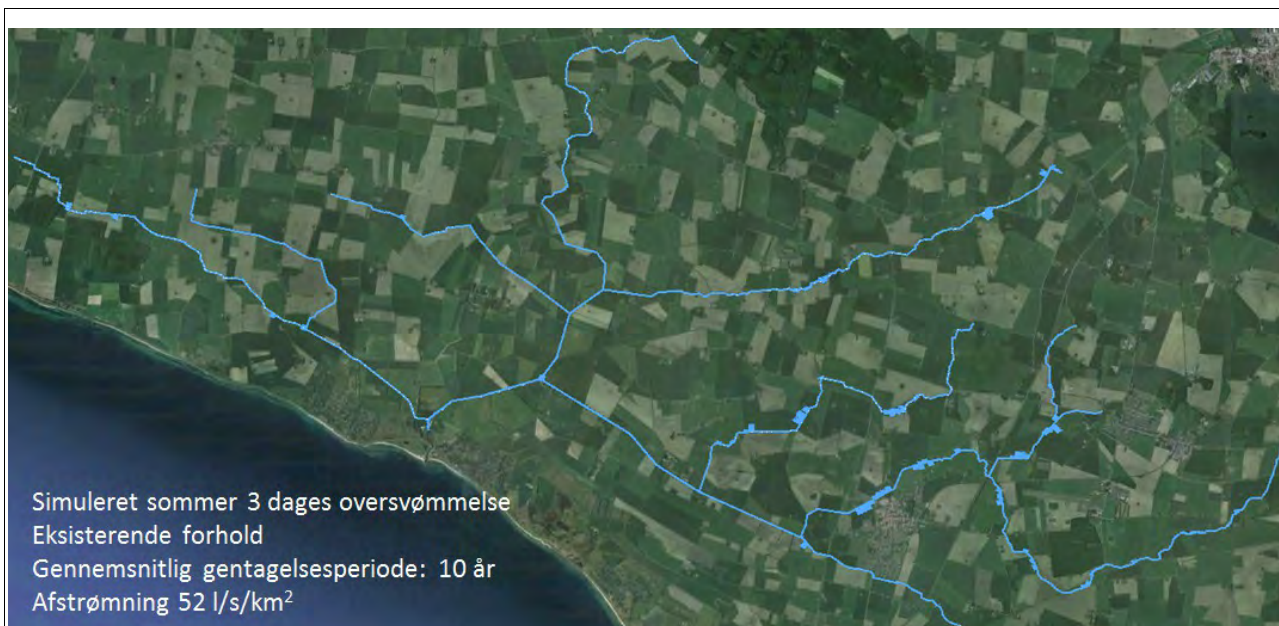
	Vækstperioden April - September	Vinterperioden Oktober - marts
Kritisk afstrømning i forhold til vand på terræn	65 l/s/km ²	80 l/s/km ²
Kritisk afstrømning i forhold til drænkoter	10 l/s/km ²	20 l/s/km ²
Gentagelsesperiode for en dag med vand på terræn. Nuværende klima	15 år	5 år
Gentagelsesperiode for 3 dage med vand på terræn. Nuværende klima.	32 år	14 år
Gentagelsesperiode for en dag med vand på terræn. Klimafaktor 1.2.	11 år	3 år
Gentagelsesperiode for 3 dage med vand på terræn. Klimafaktor 1.2.	20 år	7 år
Antal dage med afstrømning som kan give problemer med dræn. Nuværende klima	7 dage (4%)	27 dage (15%)
August 2011 hændelsen, nuværende klima	37 år	
August 2011 hændelsen, klimafaktor 1.2	27 år	

Tabel 7: Nøgleværdier for nuværende forhold

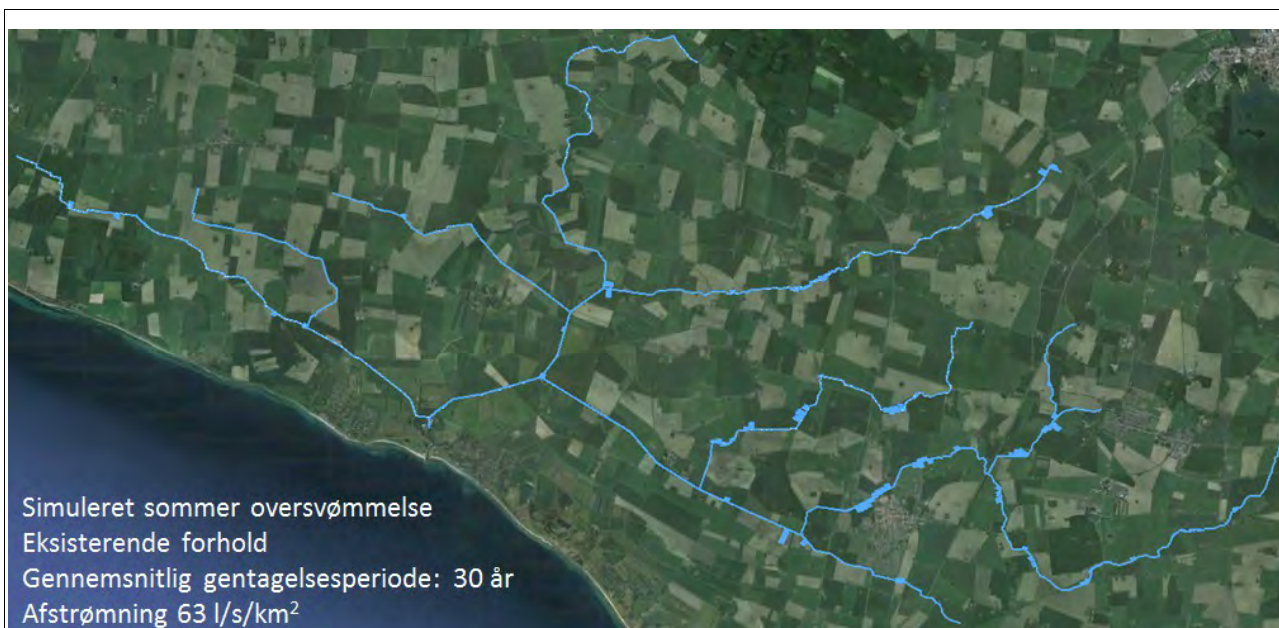
8.5 Oversvømmelseskort

Nedenfor er vist en udvalgte oversigtskort med simulerede udbredelser af oversvømmelser for forskellige gentagelsesperioder. Flere kort og mulighed for at zoome til specifikke områder kan downloades som Google Earth fil fra projektets hjemmeside.

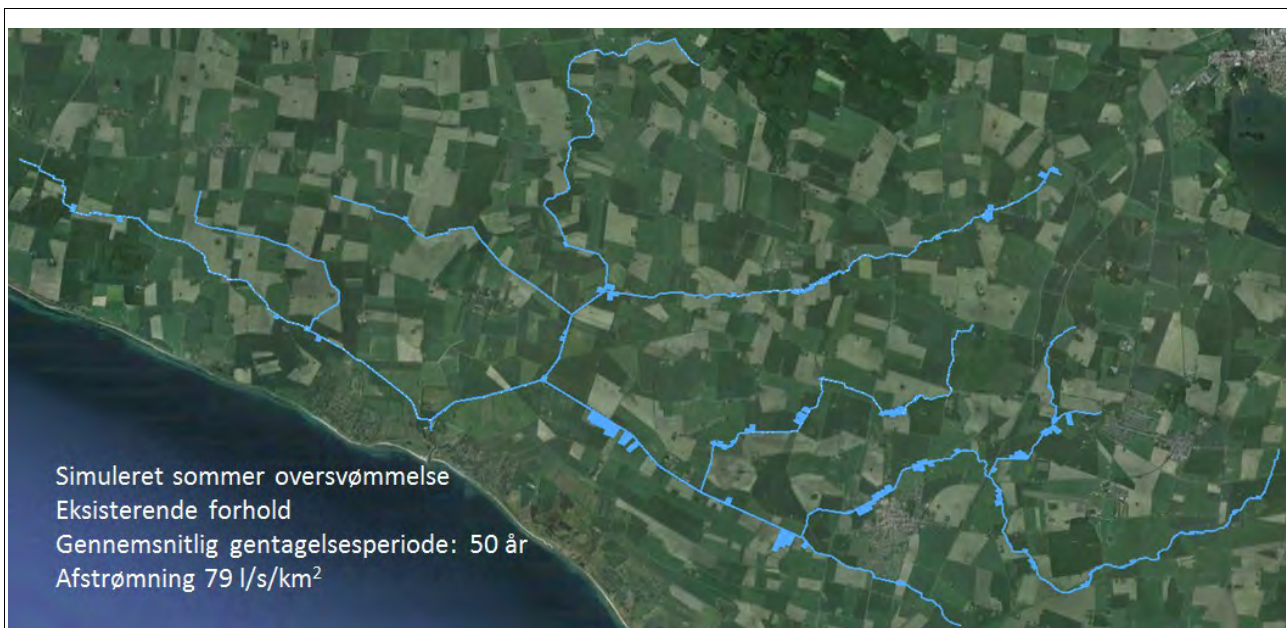




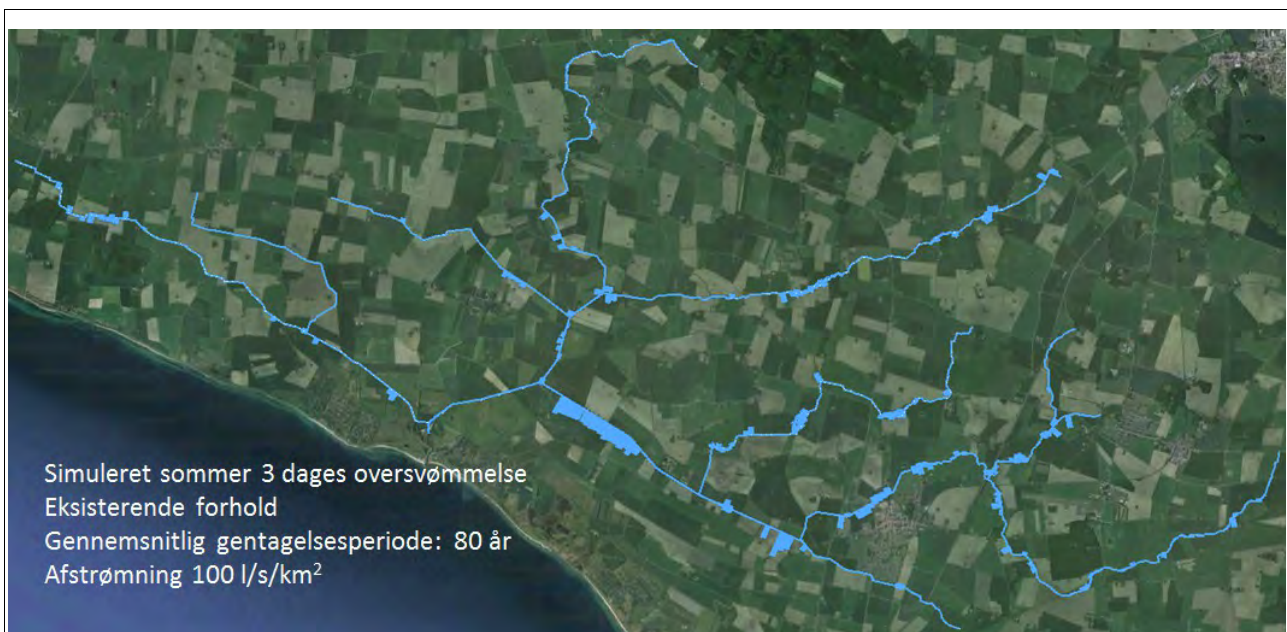
Figur 85: Kort over simulerede vanddækkede områder, Gentagelsesperiode på 20 år (ikke som angivet på figuren)



Figur 86: Kort over simulerede vanddækkede områder. Areal af oversvømmelsen: 134 ha



Figur 87: Kort over simulerede vanddækkede områder



Figur 88: Kort over simulerede vanddækkede områder







8.6 Tiltag i forhold til serviceniveau

For at undgå oversvømmelser kræves, at der ikke er for meget modstand i kanalerne samtidig med, at pumpen ved Kramnitse har tilstrækkelig kapacitet til løfte vandet ud.

Vi har tidligere analyseret effekten af forskellige tiltag i forhold til en forbedret afledning af vand. Analysen viste, at fjernelse af styrt kun havde effekt på vandstande i vandløbet få hundrede meter opstrøms styrtet og ingen effekt nedstrøms styrtet. I vækstperioden giver skæring af grøde stor effekt på den på den strækning, som skæres. Ligeledes havde udvidelse af kanaler til større bredde stor effekt i de område, hvor udvidelsen sker. For både grødeskæring og udvidelse af kanaler gælder, at der ingen effekt er nedstrøms, og effekten kun kan ses få hundrede meter opstrøms.

I det følgende er der redegjort for en analyse af effekter af grødeskæring og udvidelse af kanaler i forhold til serviceniveau og omkostninger.

8.6.1 Grødeskæring

Oversvømmelsen i august 2011 var en konsekvens af en ekstrem langvarig periode med kraftig nedbør. Yderligere kom nedbøren i august, hvor der er maksimale mængder af grøde i vandløbene.

Efter oversvømmelsen i 2011 har man ændret praksis i forhold til grødeskæring. Tidligere blev der kun skåret grøde i pumpekanalerne om sommeren, og ikke i de tilstødende hovedvandløb.

Grødeskæringen er nu udvidet med en grødeskæring af alle hovedvandløb om sommeren. Hovedvandløbene svarer til de vandløb, som indgår i Rødby fjord modellen. Disse vandløb skæres i bunden og på dele af sideskråningen om sommeren.

I alle ovenstående beregninger er Manningtal svarende til den nye praksis for grødeskæring anvendt

for sommer scenarier (Manningtal for spredt grødevækst i tabel 5).

For at undersøge effekten af denne ekstra grødeskæring er der gennemført modelberegninger efter samme princip som anvendt i afsnit 8.2, men med Manningtal svarende til tæt grødevækst. Ved gradvist at øge afstrømningsraten er det fundet, at en afstrømning på 50 l/s/km² netop giver anledning til vand på terræn i det kritiske område ved Rødby kanal (39L)(figur 74).

Ud fra figuren med gentagelsesperioder på figur 78 kan det aflæses, at en afstrømning på 50 l/s/km² i mere end 3 dage forekommer i gennemsnit hvert 18 år med nuværende klima og hvert 13 år med fremtidigt klima (klimafaktor 1.2). Beregningerne for en situation med sommerskæring viste, at den gennemsnitlige gentagelsesperiode for kritiske forhold om sommeren var 32 år for nuværende klima og 20 år for fremtidig klima (klimafaktor 1.2). Det estimeres dermed, at den ekstra grødeskæring har bevirket, at gentagelsesperiode for kritiske forhold om sommeren er øget med 14 år for nuværende klima og 7 år for fremtidig klima.

Nøgleværdierne for analysen er summeret i tabel 8 nedenfor.

	Vækstperioden Nuværende klima	Vækstperioden Klimafaktor 1.2
Eksisterende forhold (med sommergrødeskæring). Kritisk afstrømning i forhold til vand på terræn.	65 l/s/km ²	65 l/s/km ²
Uden ekstra sommer grødeskæring, Kritisk afstrømning i forhold til vand på terræn.	50 l/s/km ²	50 l/s/km ²
Eksisterende forhold (med sommergrødeskæring). Gentagelsesperiode for 3 eller flere dage med vand på terræn.	32 år	20 år
Uden ekstra sommer grødeskæring. Gentagelsesperiode for 3 eller flere dage med vand på terræn.	18 år	13 år

Tabel 8: Effekter af ekstra grødeskæring om sommeren

Omkostningen for vedligeholdelse af hovedvandløbene i Rødby Fjord er 15 kr. pr. løbende meter for sommer- og efterårsvedligeholdelsen tilsammen. Det anslås, at omkostningen til sommergevedligeholdelsen udgør 40% og efterårsvedligeholdelsen de resterende 60%, idet efterårsvedligeholdelsen er mere omfattende. Dermed kommer en sommergevedligeholdelse til at koste 6 kr. pr. løbende meter. Hovedkanalernes samlede længde er 86 km, og en ekstra sommergevedligeholdelse anslås derfor at koste omkring kr. 500.000.

Det er relevant at se omkostningerne til grødeskæring i forhold til de økonomiske tab i form af tabte afgrøder som oversvømmer giver anledning til. Det er imidlertid en meget vanskelig opgave at kvantificere sådanne tab, idet tabet blandt andet er afhængigt af hvilke afgrøder der dyrkes på de oversvømmede områder og hvilket tidspunkt i vækstperioden oversvømmelsen finder sted. Yderligere er det vanskelig at lave en præcis bestemmelse af det oversvømmede areal. Rødby modellen inkluderer kun hovedvandløbene, så de simulerede oversvømmelser dækker altså kun områder nær disse vandløb. Der kan altså være områder i de mindre vandløb som oversvømmes uden at det kan ses af modellen resultater.

Ekstra grødeskæring har effekt, hvilket kan ses af figur 94 nedenfor, som viser oversvømmelse med tæt grødevækst svarende til august uden sommergrødeskæring. Figuren kan sammenlignes med figur 86 som viser simuleret udbredelse af oversvømmelse, med spredt grødevækst, svarende til at der er foretaget sommervedligeholdelse. Området omkring station 18000 på 39L er i begge tilfælde oversvømmede, men uden sommervedligeholdelsen er der mange områder i de øverste dele af kanalerne, hvor der optræder oversvømmelser.



8.6.2 Udvidelse af Rødby Kanal

Som det fremgår af de tidligere modelberegninger og tilhørende serviceniveauer, er risikoen for oversvømmelse størst i vinterperioden. Det har tidligere være demonstreret, at øget udpumpning ikke kan løse oversvømmelsesproblemerne, idet det blot vil sænke vandstanden de første 1000 m opstrøms pumpen, og ikke have større effekt på vandstande længere opstrøms. I vinterperioden er modstand fra grøde minimal. En anden måde at øge kanalernes hydrauliske kapacitet er at udvide kanalernes tværsnitsareal. Det kan ske enten ved at grave kanalerne dybere, bredere eller en kombination af begge dele. Hvilken løsning, der er mest hensigtsmæssigt vil afhænge af en nærmere vurdering af jordens geotekniske egenskaber. Ved blot at uddybe yderligere kan der være risiko for at sideskråningerne skrider. Derimod vil udvidelse i bredden betyde, at kanalerne optager et større areal, som må tages fra eksisterende landbrugsarealer. Et andet spørgsmål er, hvilke strækninger der skal udvides. Tidligere analyser har vist at udvidelse af kanaler kun har effekt på vandstanden der, hvor udvidelsen sker og få hundrede meter opstrøms.

Som et eksempel har vi undersøgt muligheden for at lave en udvidelse af Rødby kanal på strækningen fra station 19.768m til umiddelbart opstrøms indløbet fra Nordkanal (st. 17.254 m), altså en strækning på 2.5 km (se figur 95 nedenfor) Der udvides med 20% i bredden, svarende til en forøgelse af bundbredden med omkring 2 meter.

Beregninger med Rødby Fjord modellen viser, at en sådan udvidelse vil hæve den kritiske

afstrømning fra 65 l/s/km² til 70 l/s/km² om sommeren og fra 80 l/s/km² til 90 l/s/km² om vinteren. Kriteriet for kritisk afstrømning er her vand på terræn ved station 18.280m i Rødby Kanal (39L).

Ved aflæsning på kurverne i figur 82 findes estimerede gentagelsesperioder for kritiske situationer med 3 eller flere dage med vand på terræn ved st. 18.280 på Rødby Kanal (39L). Med det bredere profil bliver gentagelsesperioden for eksisterende klima 37 år og 27 år for henholdsvis vækstperioden og vinterperioden. Tilsvarende værdier for den eksisterende kanalbredde var estimeret til henholdsvis 32 og 14 år. Resultaterne er resumeret i tabel 9 nedenfor, hvor også estimerede gentagelsesperioder for fremtidig klima er angivet.



Figur 95: Udvidet kanalstrækning

	Vækstperioden April - September	Vinterperioden Oktober - marts
Kritisk afstrømning i forhold til vand på terræn. Eksisterende geometri.	65 l/s/km ²	80 l/s/km ²
Kritisk afstrømning i forhold til vand på terræn. Bred kanal.	70 l/s/km ²	90 l/s/km ²
Gentagelsesperiode for vand på terræn i 3 eller flere dage. Eksisterende geometri	32 år	14 år
Gentagelsesperiode for vand på terræn i 3 eller flere dage. Udvidet kanal strækning.	37 år	27 år
Gentagelsesperiode for vand på terræn i 3 eller flere dage. Eksisterende geometri. Klimafaktor 1.2.	20 år	7 år
Gentagelsesperiode for vand på terræn i 3 eller flere dage. Udvidet kanal strækning. Klimafaktor 1.2.	27 år	12 år

Tabel 9: Effekter af udvidelse af delstrækning af Rødby kanal

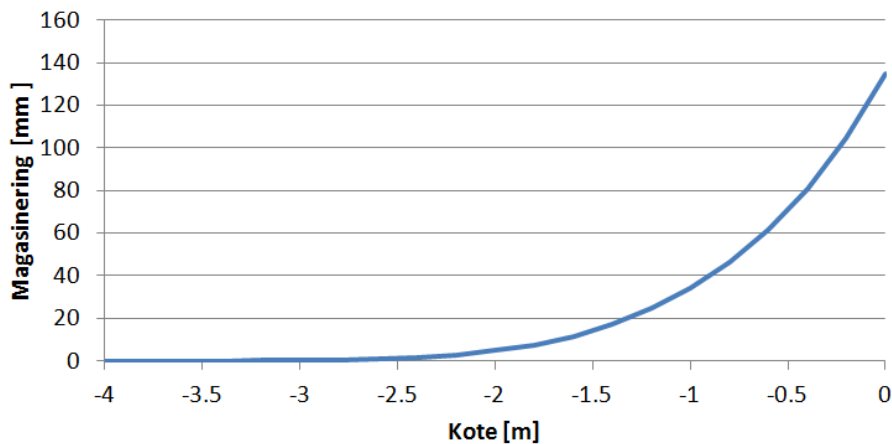
Overslag over omkostninger for udvidelse af Rødby Kanal i bredden med 20% mellem st. 17.254m og st. 19.768m (2.5 km) er vist i tabel 10 nedenfor.

	Anslået anlægsomkostning
Etablering af arbejdsplads	Kr. 50.000
Opgravning, profilering 15.000 m ³	kr. 450.000
Ændring, sikring af eksisterende rørdløb	kr. 30.000
Erstatning for afståede arealer	kr. 125.000
Erstatning for udjævning af fyld	kr. 300.000
Opmåling, projektering	kr. 150.000
I alt.	kr. 1.105.000

Tabel 10: Overslag over anlægsomkostninger til udvidelse af delstrækning på Rødby Kanal

8.6.3 Kontrolleret oversvømmelse

I forbindelse med klimasikring i byområder benyttes ofte kontrollerede oversvømmelser. Herved oversvømmes mindre vigtige områder i stedet for mere vigtige områder. For at undersøge om det kunne være en mulighed har vi for forskellige koter beregnet det underliggende volumen. Efterfølgende har vi beregnet, hvor meget nedbør det svarer til over hele oplandet. Resultatet er vist i nedenstående figur.



Figur 96: Magasinering ved oversvømmelse af lavtliggende områder.

Figuren viser, hvor mange millimeter nedbør over hele oplandet, der skal til for at fylde alle arealer under en given kote op, hvis der hverken fordampes eller magasineres i jorden. Ved omkring 140 mm bliver alt under kote 0, altså hele den gamle Rødby Fjord, fyldt op. Sammenholdes figuren med, at pumpens kapacitet er 8 mm om dagen, fås det, at det er relativt store arealer, der skal benyttes før det får nogen effekt. Samtidig er der ikke den store forskel i værdien af de områder, der potentielt kan oversvømmes. Alt i alt er kontrolleret oversvømmelse næppe en løsning, der kan anvendes til at øge serviceniveauet.

Grafen kan også bruges til at vise, at hvis pumpen stopper helt, så vil man efter 140 mm kunne åbne sluserne til havet, da vandstanden så vil være kote 0.

8.7 Vurdering af usikkerhed og sikkerhed

Det er vigtigt at understrege, at der er mange usikkerhedsfaktorer i ovenstående vurderinger omkring serviceniveau i nuværende og fremtidig klima. Her vil vi kort give vores kvalitative bud på sikkerheden og usikkerheden. Generelt er det altid mest sikkert, når modellerne anvendes til at sige noget om relative ændringer. Det vil sige vi er ret sikre, når vi bruger modellerne til at forudsige betydningen af ændringer i dræning, befæstelsesgrad, grødeskæring og vandløbsgeometri. Omvendt er vi mindre sikre, når vi bruger modellernes absolutte værdier, såsom vandstand over eller under et givent niveau.

Den altovervejende største usikkerhed knytter sig til vurderingen af fremtidens klima. Som beskrevet er det ikke på nuværende tidspunkt muligt at give sikre bud på, hvordan klimaændringerne vil påvirke afstrømningen i Rødby Fjord oplandet.

Som opsummering er vi ret sikre på, at de ændringer vi har foreslået, vil øge kapaciteten af systemet, men vi er usikre på, hvor mange oversvømmelser i fremtiden der kan forhindres.

9 Konklusion og anbefalinger

I nærværende rapport er der lavet analyser af det eksisterende serviceniveau for Rødby Fjord som helhed. Yderligere er der lavet estimer på, hvordan serviceniveauet kan udvikle sig i forhold til fremtidig klima. Der er givet eksempler på tiltag, som kan forbedre serviceniveauet, samt lavet overslag over omkostninger sådanne tiltag til have.

På nuværende tidspunkt vurderer vi, at usikkerheden på klimamodellerne giver en forholdsvis stor usikkerhed, når resultaterne anvendes, som det er nødvendigt for Rødby Fjord. Der skønnes, at der inden for de kommende år ikke er behov for generelle ændringer i forhold til udgravning eller øget grødeskæring. Der sker en stor udvikling inden for klimaforskning, og det forventes, at der inden for f.eks. en 5 års periode, vil komme bedre data og metoder til rådighed. Yderligere vil de opsatte vandstandsloggere efter en sådan periode kunne bidrage med data fra situationer med høj afstrømning, og modelsystemet vil dermed kunne kalibreres yderligere og give mere præcise resultater. Det anbefales derfor at lave en ny vurdering efter 5 år.

Analyserne af serviceniveau er lavet for Rødby Fjord området som helhed. Nogle områder vil imidlertid være mere sårbare i forhold til oversvømmelse og problemer med dræn. Det anbefales, at man for sådanne områder overvejer lokale løsninger.

10 Referencer

Arnbjerg, K. 2008. "Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer" IDA Spildevandskomiteen.

Børgesen, C. D., Thomsen, I. K., Søgaard, K., Plauborg, F. & Vinter, F. P. 2012. "Notat om afvandsdybder ved reduceret vandløbsvedligeholdelse" DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug" Aarhus Universitet.

Doherty, J. 2010. "PEST – Model independent parameter estimation". Watermark Numerical Computing.

Henriksen, H.J., Olsen, M. & Troldborg, L. 2013. "Klimaekstremvandføring, Klimaeffekter på hydrologi og afstrømning". GEUS 2013/29

DMI 2012. Daily and Monthly values 1989-2010. Technical Report 12-10. DMI, Klima- og Energiministeriet. <http://beta.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr12-10.pdf>

Højberg et al. (2010). DK-model2009, Sammenfatning af opdateringen 2005 – 2009. Anker L. Højberg, Lars Troldborg, Per Nyegaard, Maria Ondracek, Simon Stisen & Britt S. B. Christensen. GEUS rapport 2010/81

Iversen et al. 2009. Kortlægning af risiko for makroporestrømning. B.V. Iversen, C.D. Børgesen, M. Lægdsmand, M. H. Greve, G. Heckrath, C. Kjærgaard. Vand og Jord, 16. årg nr. 2, 2009.

Plauborg et al. (2002). Vandbalance på mark- og oplandsskala. Plauborg, F., Refsgaard, J.C., Henriksen H.J., Blicher-Mathiesen, G. & Kern-Hansen, C. DJF-rapport 70, 45 pp. 2002.

Styczen, M., Hansen, S, Jensen, L. S., Svendsen, H., Abrahamsen, P., Børgesen, C. D., Thirup, C. & Østergaard, H. S. (2006): Standardopstillinger til Daisy-modellen. Vejledning og baggrund. Version 1.2, april 2006. DHI Institut for Vand og Miljø. 62 pp.

RegioCura. (2013). Tværgående samarbejde om klima tilpadsning for Rødby Fjord. Interessentrapport.

U.S ARMY CORPS. HEC-RAS. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

11 Appendiks.

11.1 Beskrivelse af dataformater

I nedenstående afsnit beskrives de formater, hvorpå tværsnitsdata kan downloades.

11.1.1 CSV format

Geometrier for samtlige vandløb som indgår i Rødby Fjord modellen er gemt i kommaseparerede tekst filer (CSV filer). CSV filer har den store fordel, at de kan læses med en almindelig tekst editor (f.eks. Notepad, Word, osv). Yderligere kan disse direkte åbnes med Microsoft Excel eller andre regnearksprogrammer, hvilket gør det let at søge, sortere og tegne grafer som f.eks. længdeprofiler eller specifikke tværsnit. Alle punkter i CSV filerne har tilknyttet koordinater, hvilket giver mulighed for at importere disse i de fleste GIS programmer.

Grundprincippet i den datamodel, som ligger til grund for CVS filerne er, at alt opfattes som punkter. Alle punkter har X, Y og Z koordinater, alle punkter har en stationering og alle punkter er tilknyttet et vandløb og en vandløbsstrækning.

I tabel 3 nedenfor er en beskrivelse af de enkelte kolonner i CSV filen givet.

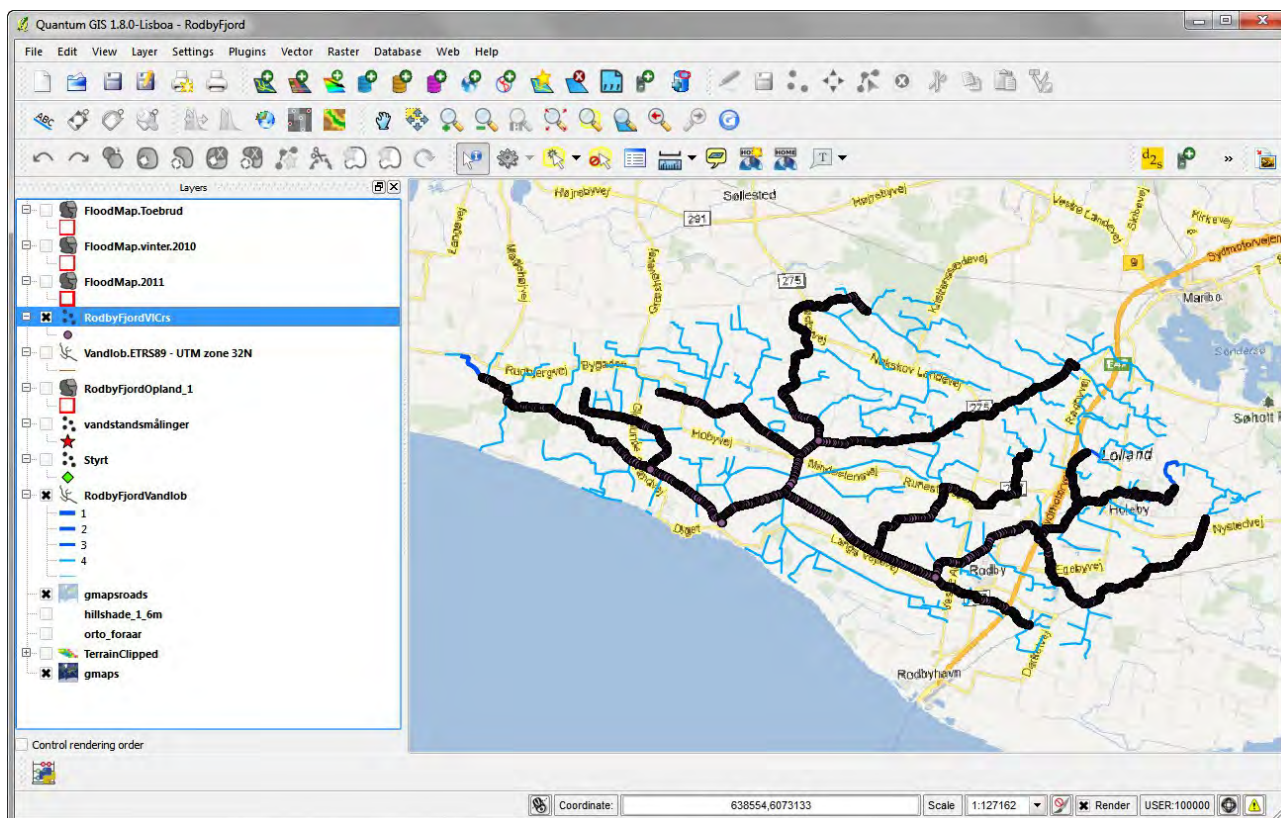
Kolonne	Beskrivelse
River	Navn / nummer på hovedvandløbet
Reach	Navn / nummer på delstrækning
Station	Stationering. Afstand i meter langs vandløbet, stigende i nedstrøms retning
seq	1,2,3... N. Rækkefølge for de enkelte målepunkter i hvert opmålt tværsnit.
Dx	Relativ vandret afstand fra dybeste punkt til målepunkt i det enkelte tværsnit. (meter)
Dz	Relativ lodret afstand fra dybeste punkt til målepunkt i det enkelte tværsnit. Positiv opad. (meter)
UTM-X	UTM zone 32 x-koordinat for målepunkt. (meter)
UTM-Y	UTM zone 32 y-koordinat for målepunkt. (meter)
DVR90-Z	DVR90 kote for målepunkt. (meter)
Longitude	Længdegrad for målepunkt (decimal grader)
Latitude	Breddegrad for målepunkt (decimal grader)
Markers	Markering. Center = dybeste punkt , Left-levee = venstre brink, Right – Levee = højre brink
Npp	Antal målepunkter i tværsnittet.
Catchment Area	Oplandsareal (m ²)
Description	Beskrivelse.
ChainageType	Fixed = Bestemt fra opmåling, Interpolated = interpoleret mellem målepunkter
XY Type	Fixed = Bestemt fra opmåling, Interpolated = interpoleret mellem målepunkter
Z Type	Fixed = Bestemt fra opmåling, Interpolated = interpoleret mellem målepunkter
Version	ID for opmålingen (hvem har opmålt og hvornår)

Tabel 3. Beskrivelse af felter i CSV filerne for vandløb.

11.1.2 Shapefiler

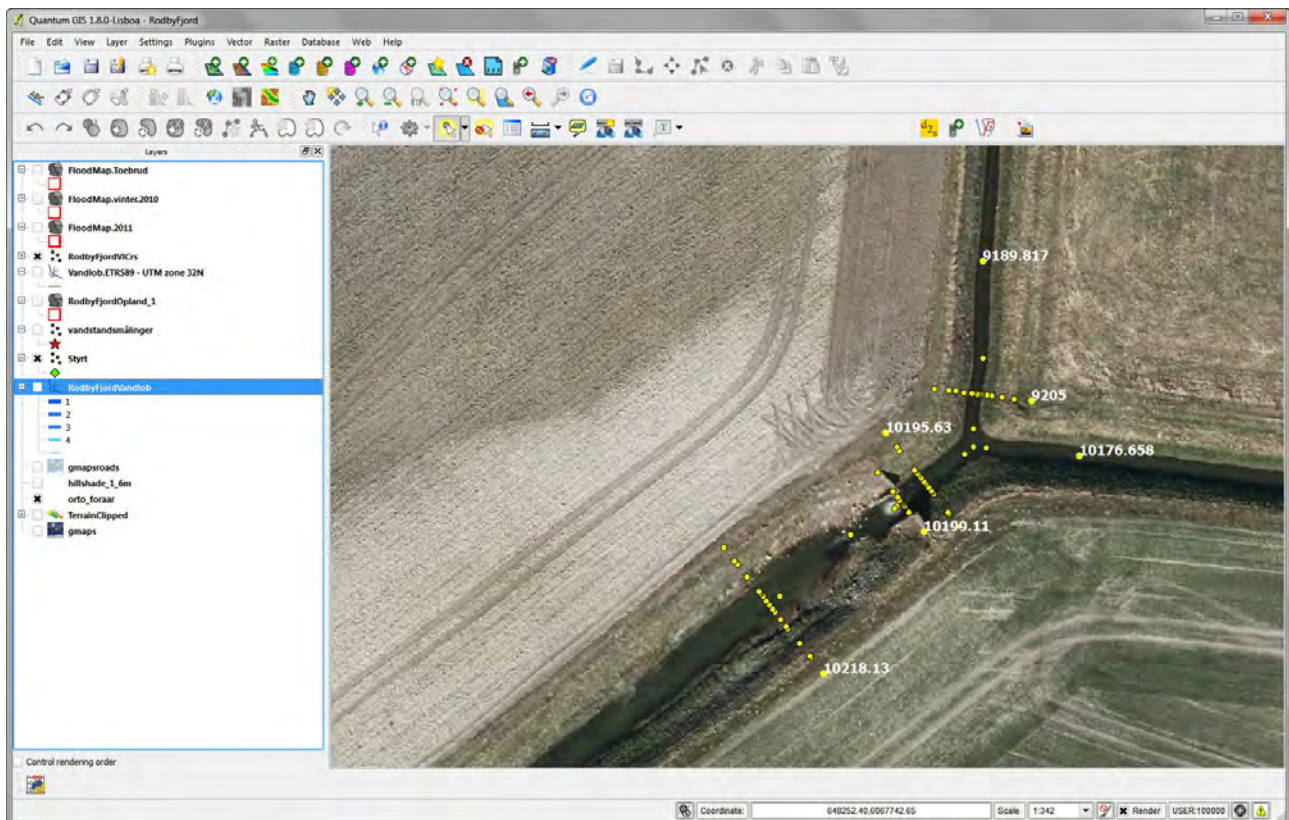
Shape filer er en filstandard udviklet af ESRI, som er en af de dominerende leverandører af GIS systemer. Shape filer er bredt anvendt og kan læses af en lang række GIS programmer.

Samme information, som er indeholdt i CVS filerne, (som beskrevet ovenfor) er konverteret til Shape fil format. Shapefilerne giver en nem adgang til at se den præcise placering af alle punkter og deres stationering i forhold til brugervalgte baggrundskort.



Figur 97: Rodby Fjord vandløb vist i QGIS

På Figur 98 ses et eksempel, hvor der er zoomet ind på en lille stækning, hvor Korterupbæk (35L) og Vejlebyløbet (34L) løber sammen. Yderligere ses styrtet nedstrøms for sammenløbet. Figuren viser enkeltpunkter fra digitaliseringen og placering af de enkelte målepunkter fra vandløbsopmålingen med tilhørende stationeringer.

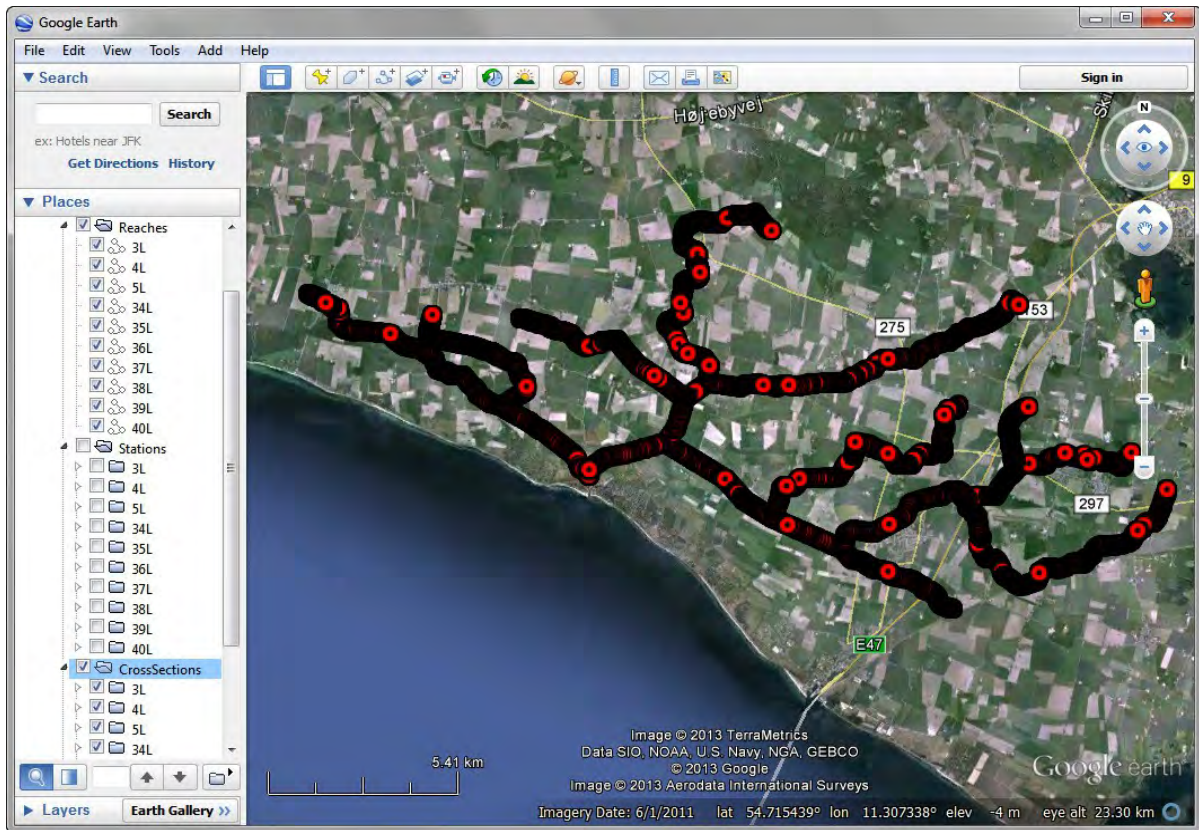


Figur 98: Eksempel på visning af vandløbs shape filer i GIS system (QGIS).

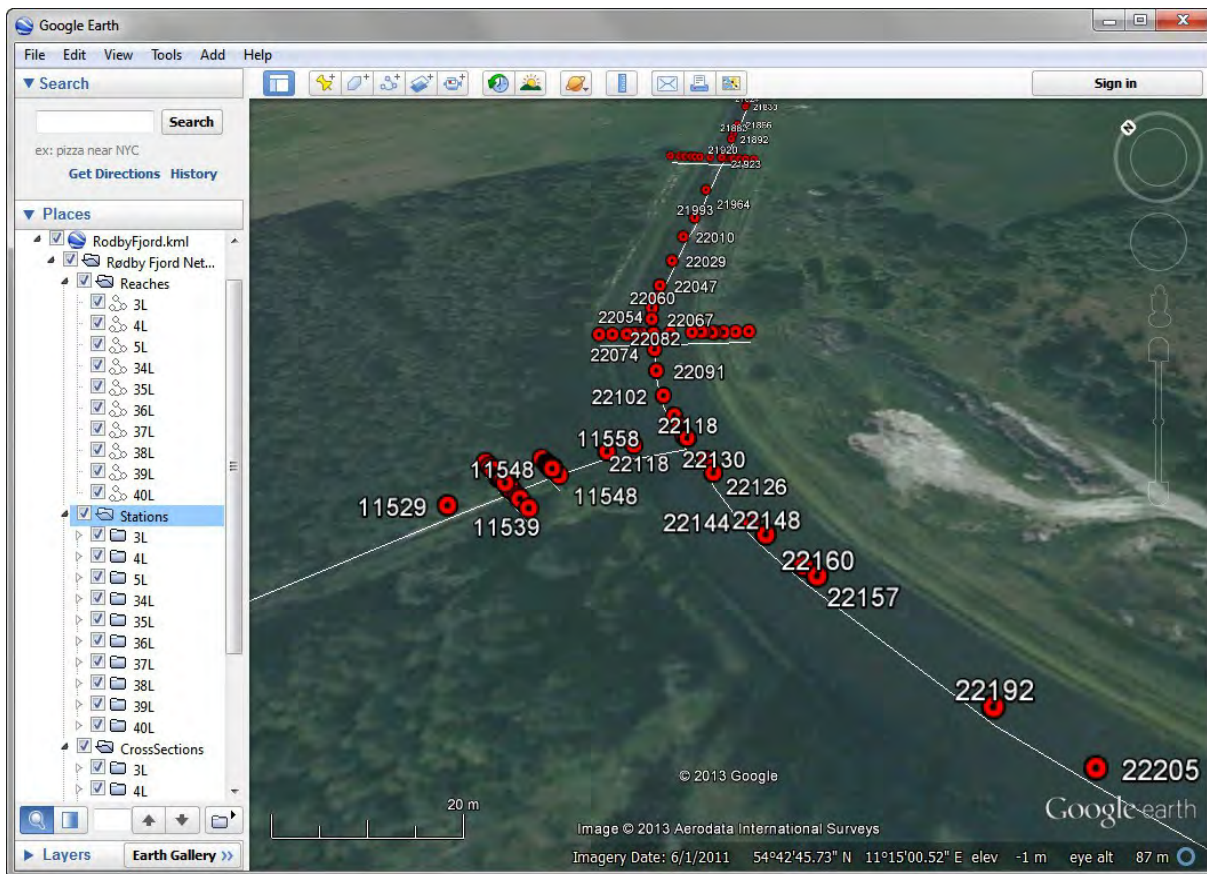
11.1.3 KML filer

KML (Keyhole Markup Language) er et XML baseret filformat til visning af data på kort. Filerne kan hentes ind i GIS systemer, men det egentlige formål med at skrive vandløbsdata ud til KML format er at denne fil direkte kan åbnes i Google Earth. Hvis man hurtigt vil have et overblik over vandløbenes forløb og stationeringer er det absolut hurtigste at anvende Google Earth. Hvis Google Earth er installeret på computeren, skal man typisk blot dobbeltklikke på filen, så starter Google Earth og åbner filen.

På figuren nedenfor ses, hvordan vandløbene fremstår i Google Earth.



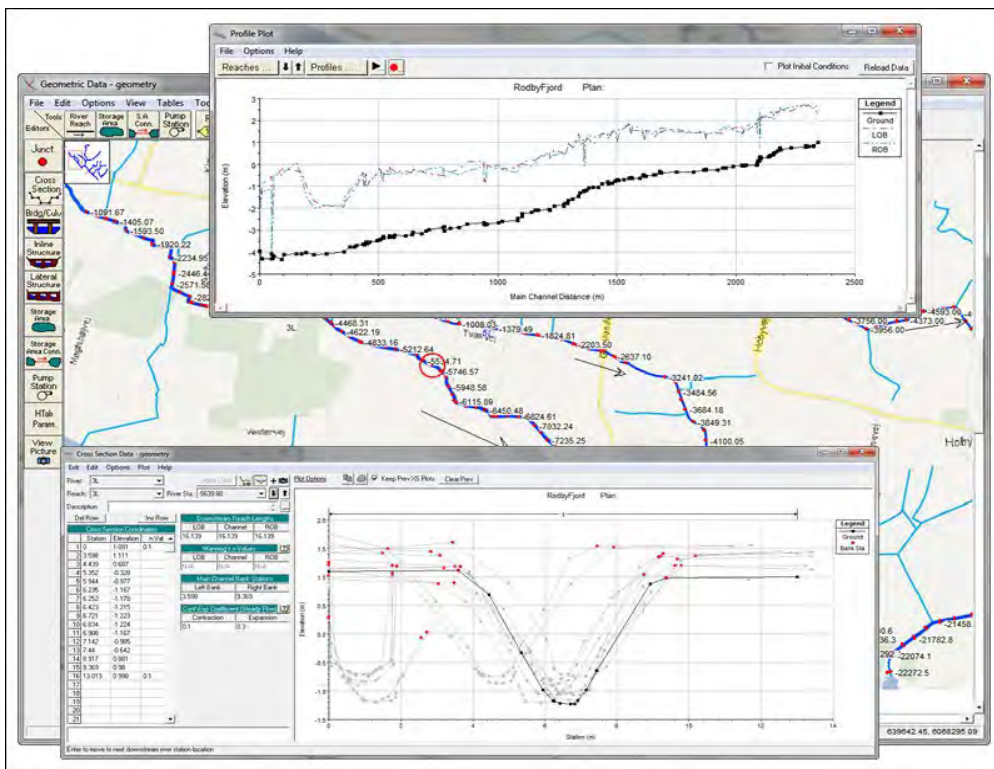
Figur 99: Rødby Fjord vandløb i KML format vist i Google Earth



Figur 100: Rødby Fjord vandløb i KML format vist i Google Earth.

11.1.4 SDS filer

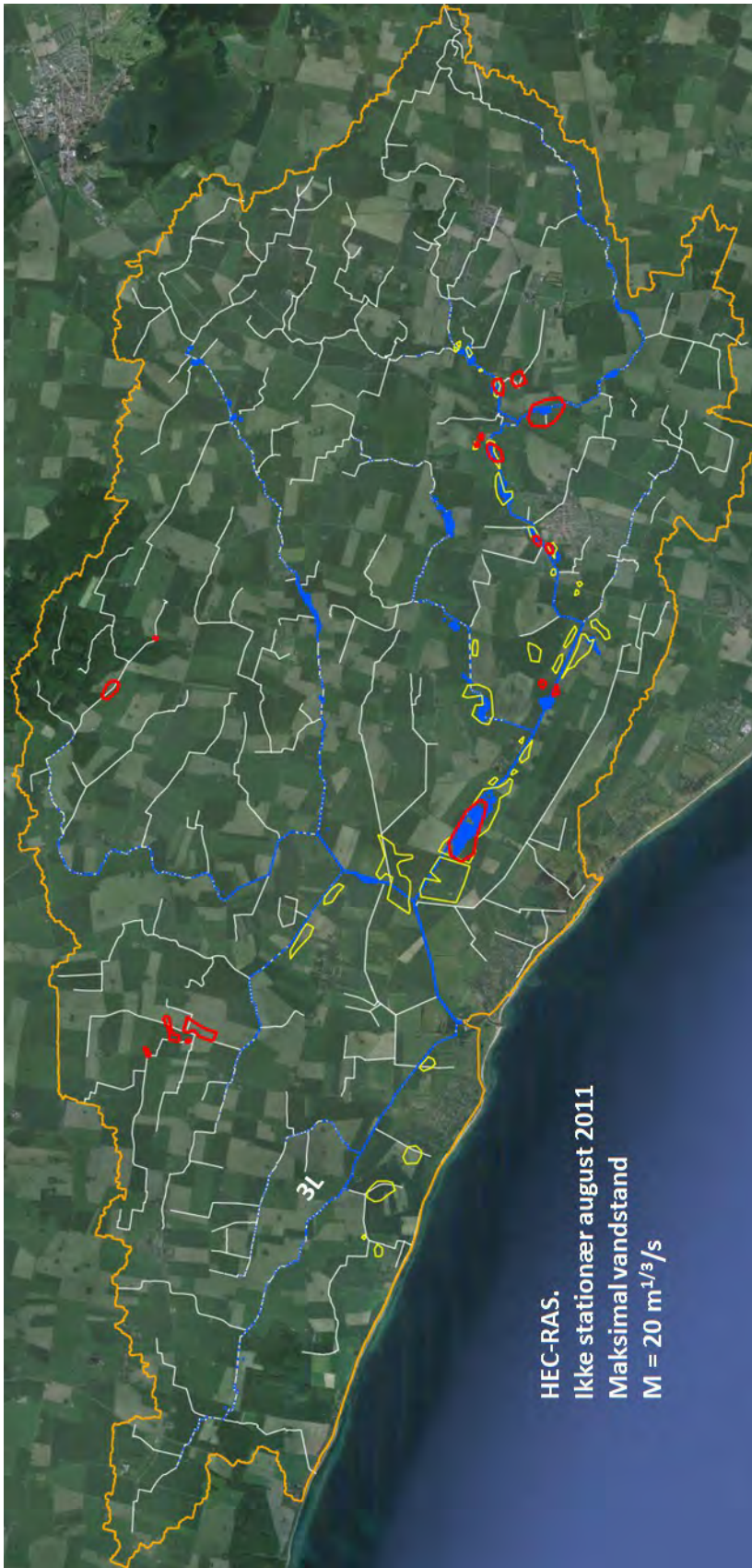
Geometrien for alle vandløb er eksporteret til SDF format, som direkte kan importeres i vandløbsmodellen HECRAS. Udover det primære formål med anvendelse af HECRAS, nemlig beregning af vandstande, er HECRAS også anvendt i forbindelse med dataindsamlingen til validering af tværsnitsdata. Når data er hentet ind i HECRAS, er der nem adgang til plots af tværsnit og længdeprofiler og dermed til en grov validering, hvor det vurderes om vandløbsfald og tværsnit ser fornuftigt ud.



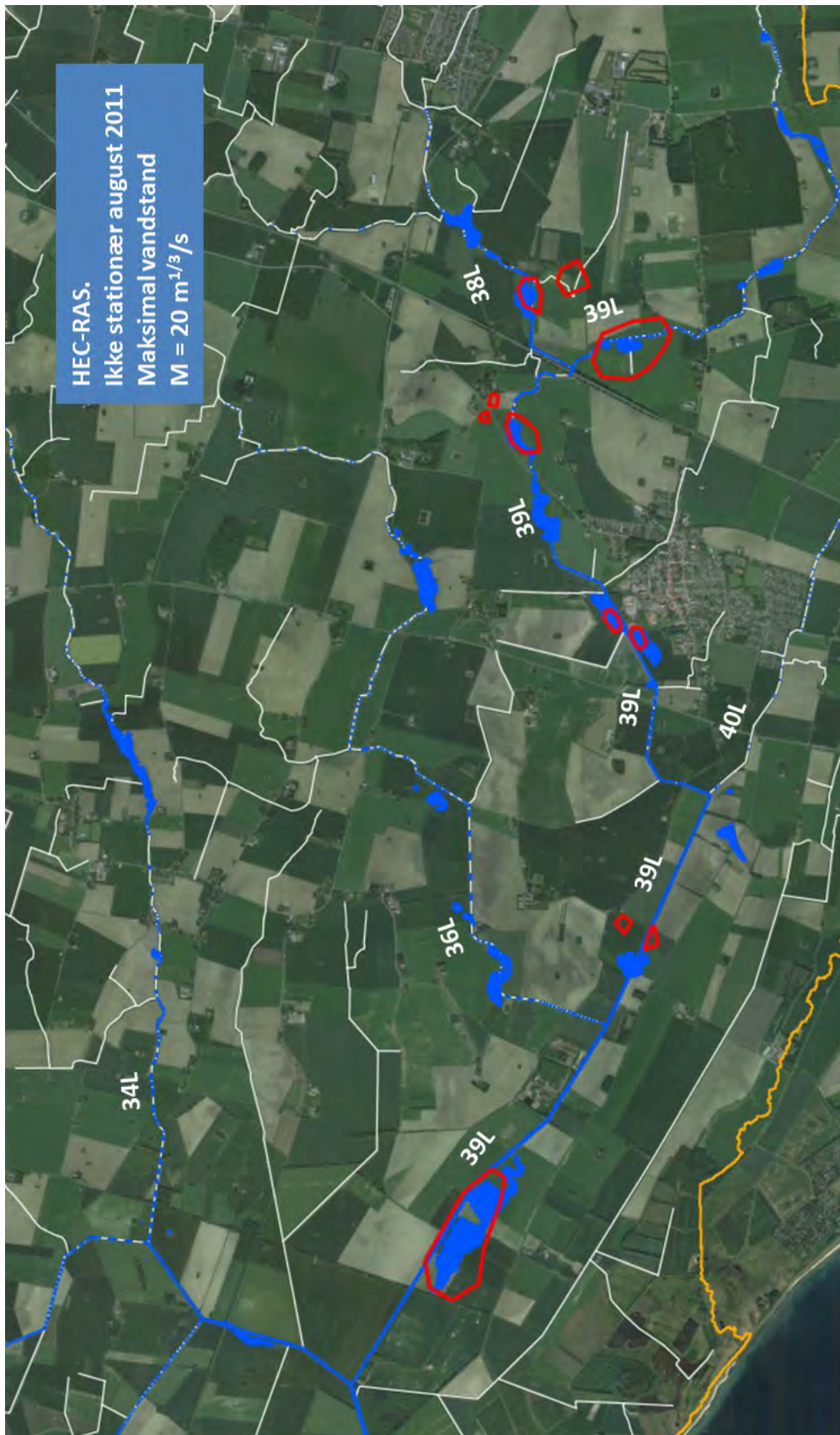
Figur 101: HECRAS visning af længdeprofil og tværsnit for Lilleholm kanal (3L).

11.2 Figurer i stort format

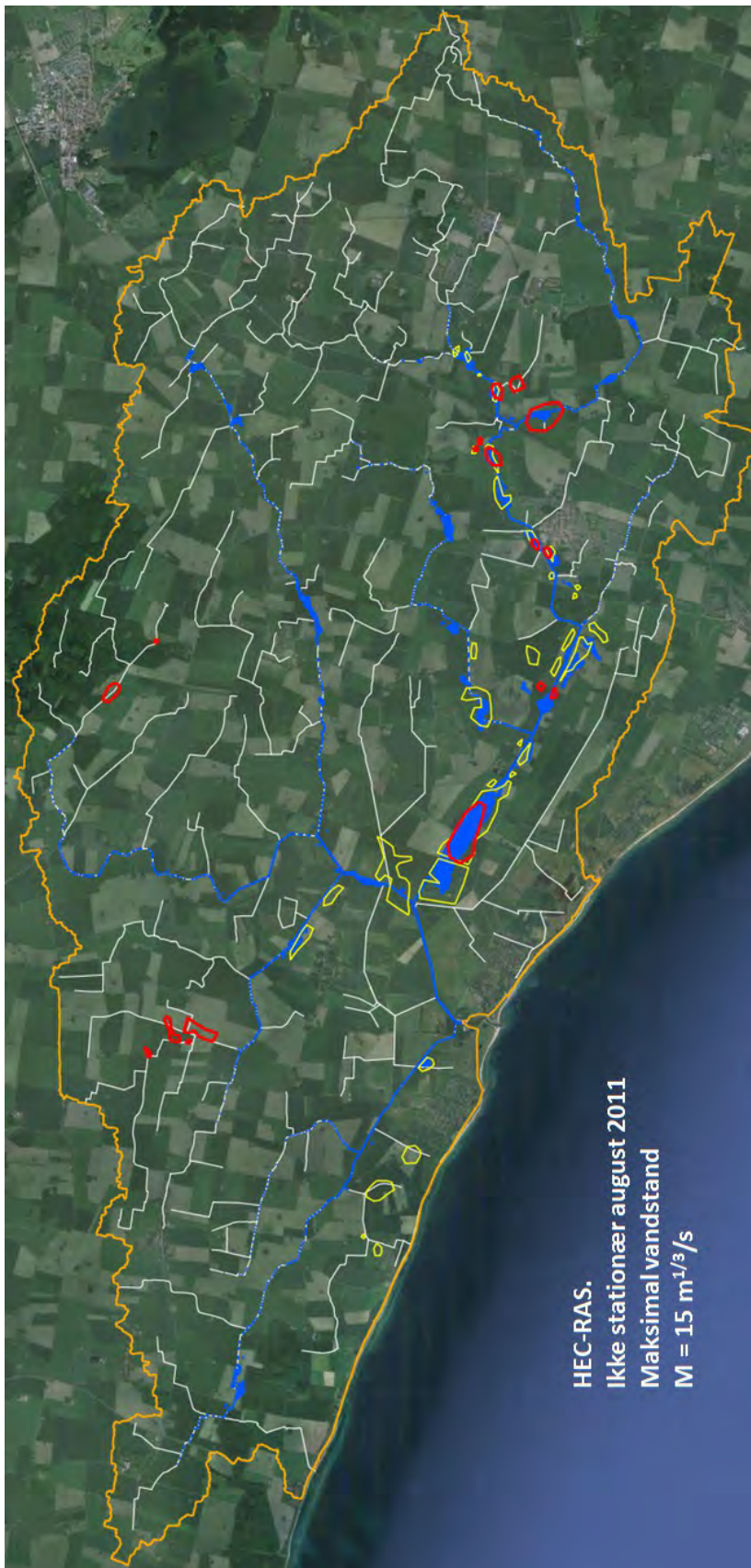
For at gøre det lettere at se detaljer i udvalgte figurer er disse figurer i det nedenstående vist i et større format. Endvidere er tilføjet en figur som viser de simulerede udbredelser af oversvømmelser for flere Manningtal på samme figur:



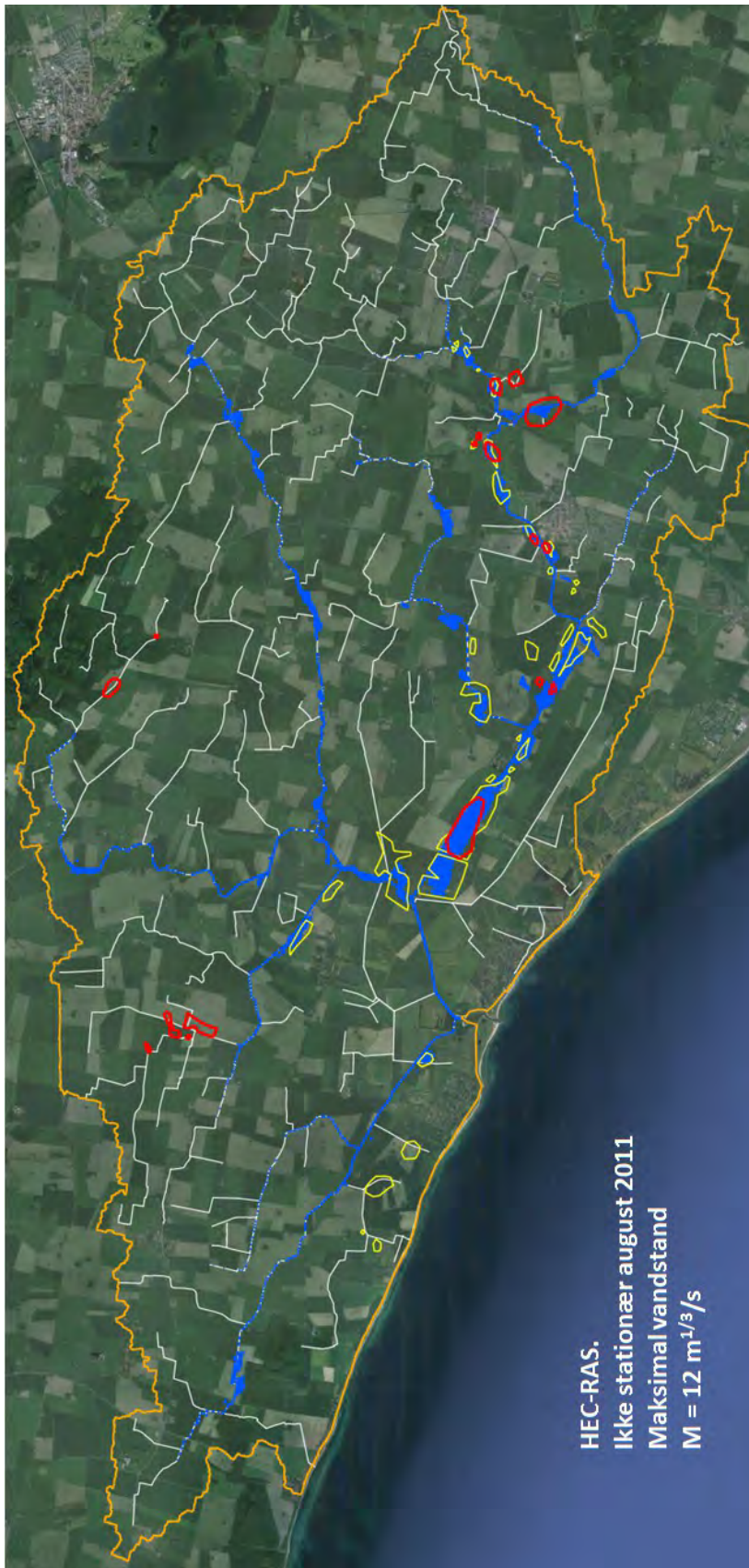
Figur 102: (Større version af figur 11 & 14) Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner)



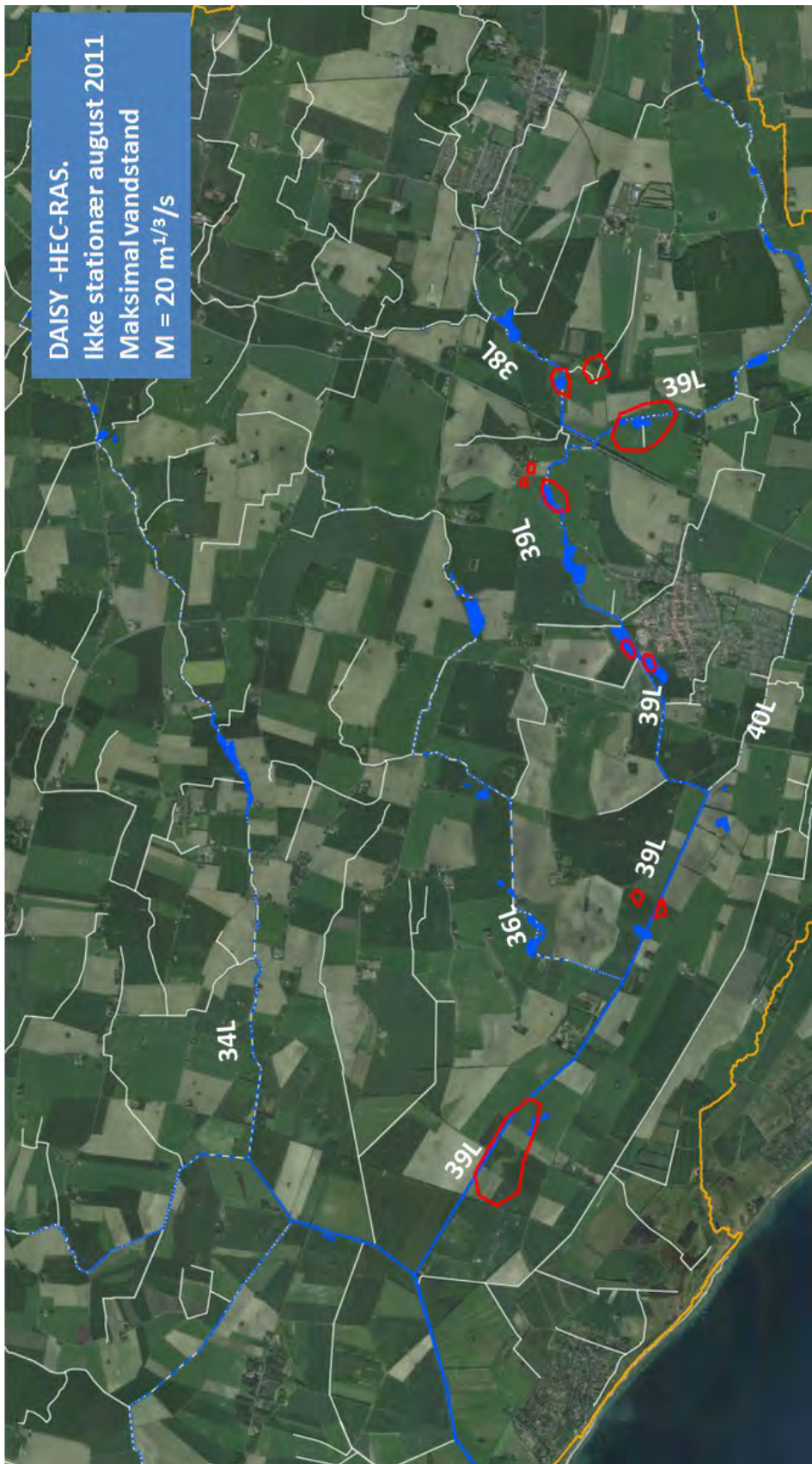
Figur 103: (Større version af figur 12) Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder) og skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner)



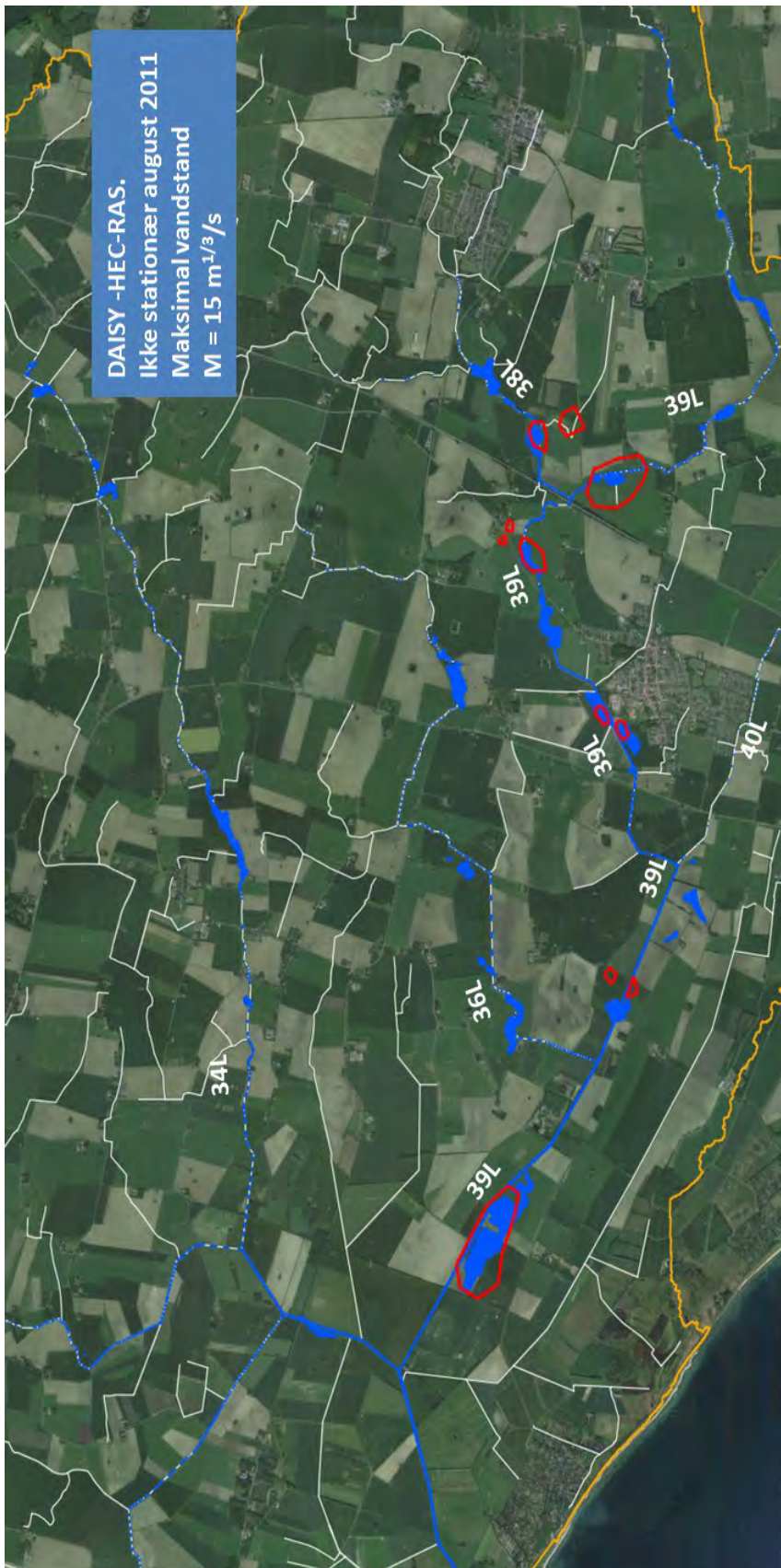
Figur 104: (Større version af figur 15) Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner)



Figur 105: (Større version af figur 16) Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder), skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner) og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 (gule polygoner)



Figur 106: (Større version af figur 17) Samlet DAISY- HEC-RAS model. Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder) og skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner)



Figur 107: (Større version af figur 18) Samlet DAISY- HEC-RAS model. Simuleret udbredelse af maksimal oversvømmelse i august 2011 (blå områder) og skitser over observerede udbredelser af oversvømmelse for august 2011 (røde polygoner)



Figur 108: Ikke stationære HEC-RAS simuleringer, hvor udbredelser af oversvømmelse i forhold til anvendelse af forskellige Manningtal er vist med forskellige farver. Den observerede udbredelse af oversvømmelse i august 2011 er vist med orange polygon og udbredelse af vinter oversvømmelse 2010 er vist med gule polygoner.