

CC C2C Gudenå

21.06.2019 Randers



C2C
Coast to Coast
Climate Challenge



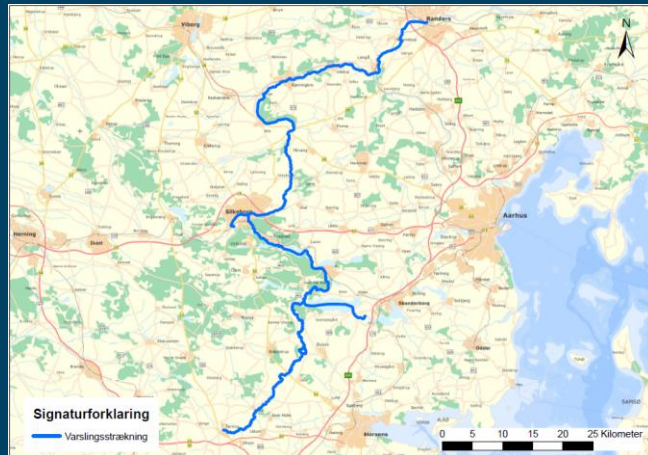
Præsenteret af Torsten V. Jacobsen, DHI på vegne af :
Hedensted, Horsens, Skanderborg, Silkeborg, Favrskov,
Viborg og Randers kommuner, Skanderborg Forsyning



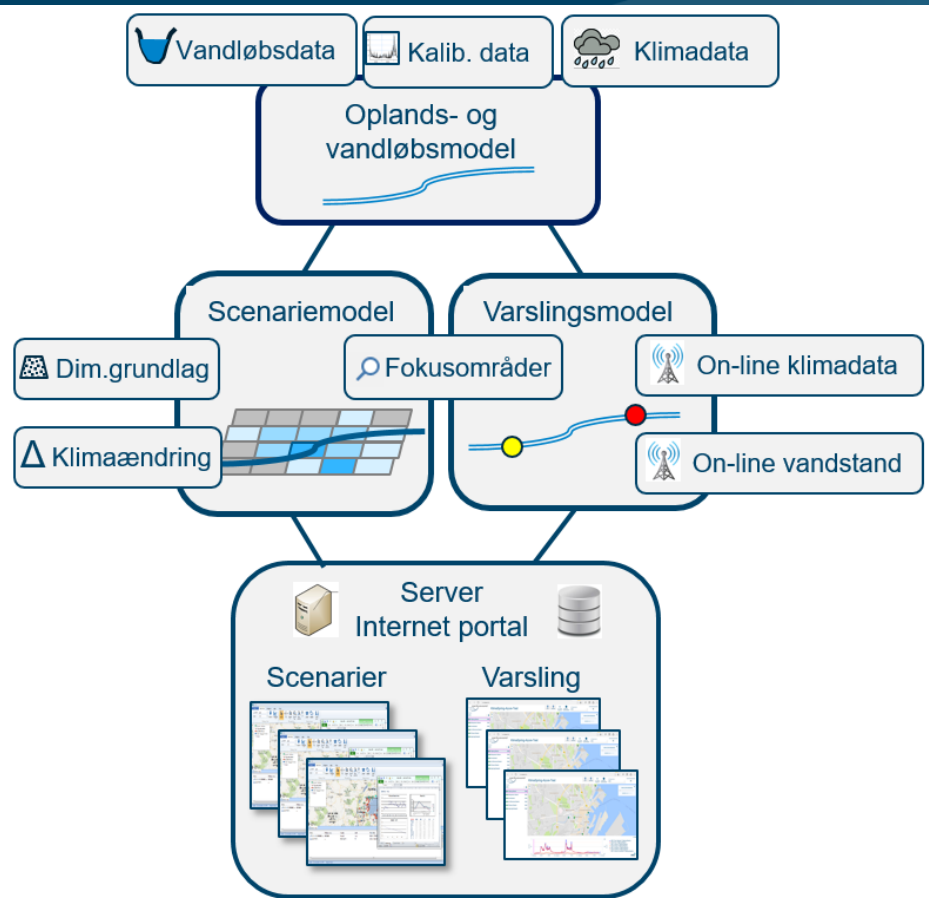
Opgaven som formuleret :

- 1) Udvikling af hydraulisk model for Gudenå,
- 2) Model anvendt i klimatilpasningsscenarier,
- 3) Varslingsmodel for oversvømmelser langs Gudenåen.

Status : Foreløbige resultater – tal med forbehold



Overordnet projektdiagram



Del 1 : Opstilling og kalibrering af Gudena model

Del 2 : Indbyg vandløbsmodel i Gudena CC scenariemodel og varslingsmodel

Del 3 : Internet, varslingsmodel

Gudenå klimatilpasning

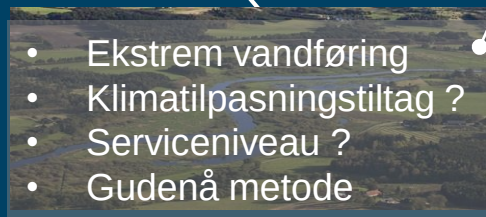
1. Byer



2. Kyster



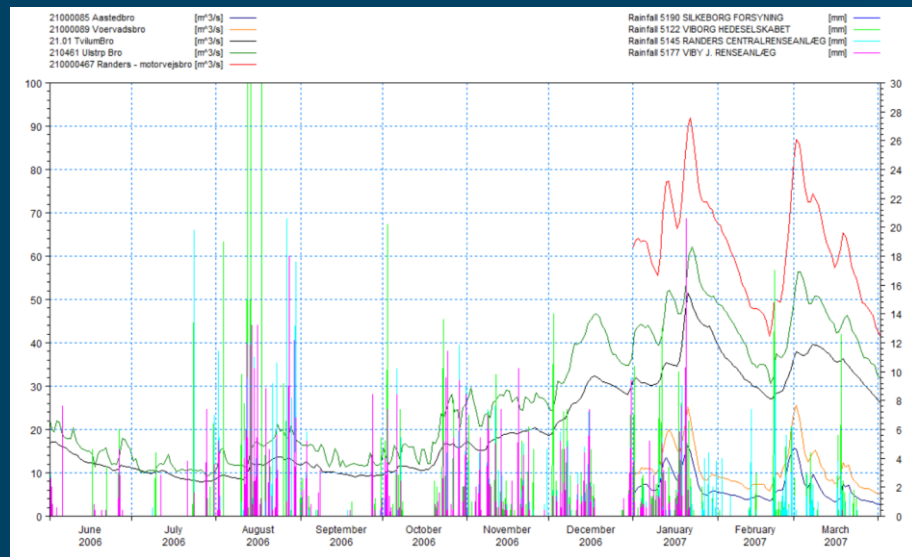
3. Vandløb, åbent land



Gudenå klimatilpasning – tilpasset metode

1. Kræver Gudenå en speciel tilgang ? – ja

- a) Stort og varierende opland – lang responstid, maks Q ikke styret af skybrud
- b) Store søvolumener, bred ådal, grundvand - magasineringseffekter
- c) Betydelig tilvækst i vandføring over 160 km – mange stationer inddrages



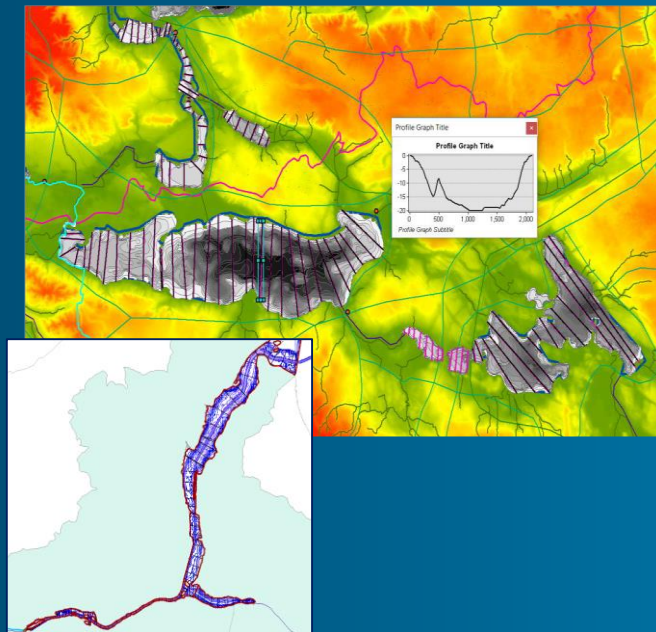
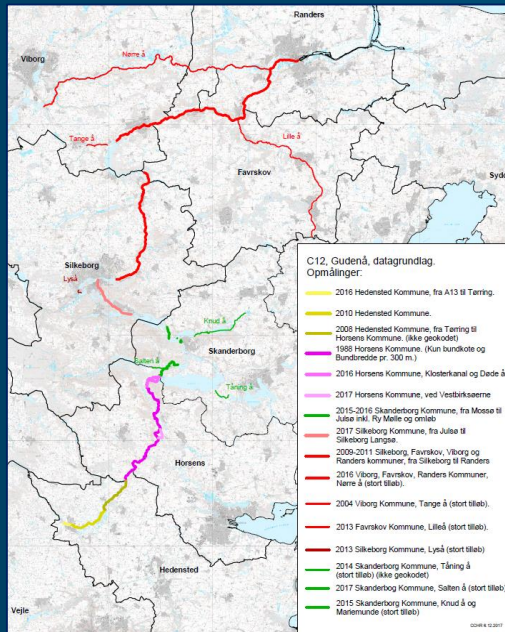
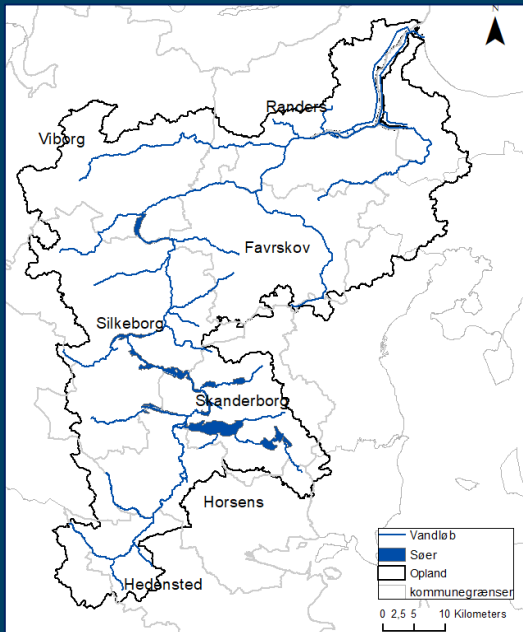
Gudenå vandløbsmodel

Fra Tinnet Krat til Randers – forlænget med simpel fjordmodel til Udbyhøj

Ca. 160 km Gudenå vandløbsstrækning + ådal , søer på hovedløb

Bygværker/opstemninger

Fokus på Gudenå hovedløb – større sidetilløb med mindre detalje



Varslingsmodel

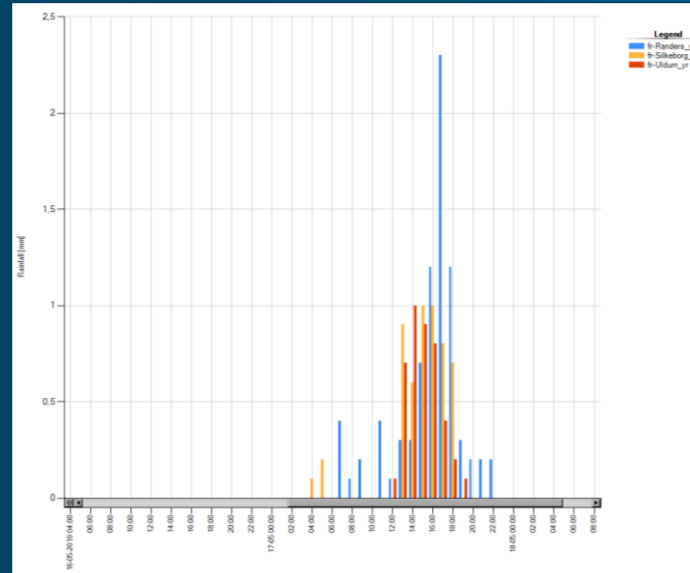
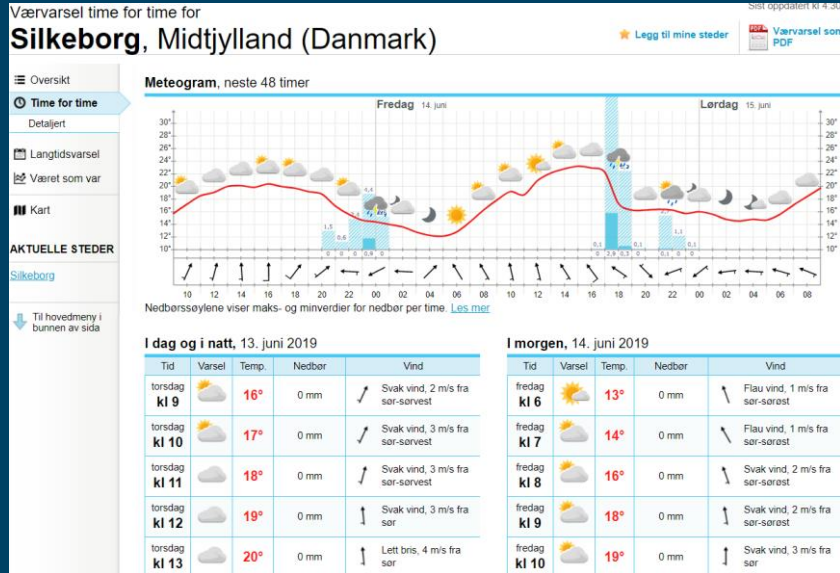
- Automatiseret Gudenå varslingsmodel for vandstand og oversvømmelse
- Kører hver 6 time
- Indsamler hver gang seneste data for nedbør, målt vandstand og vandføring
- Opdaterer prognose for de 2 seneste dag samt 3 dag ud i fremtiden
- Sender opdaterede resultater til internet side
- Giver myndigheder, borgere, beredskab m.fl. mulighed for at følge status og forventet udvikling



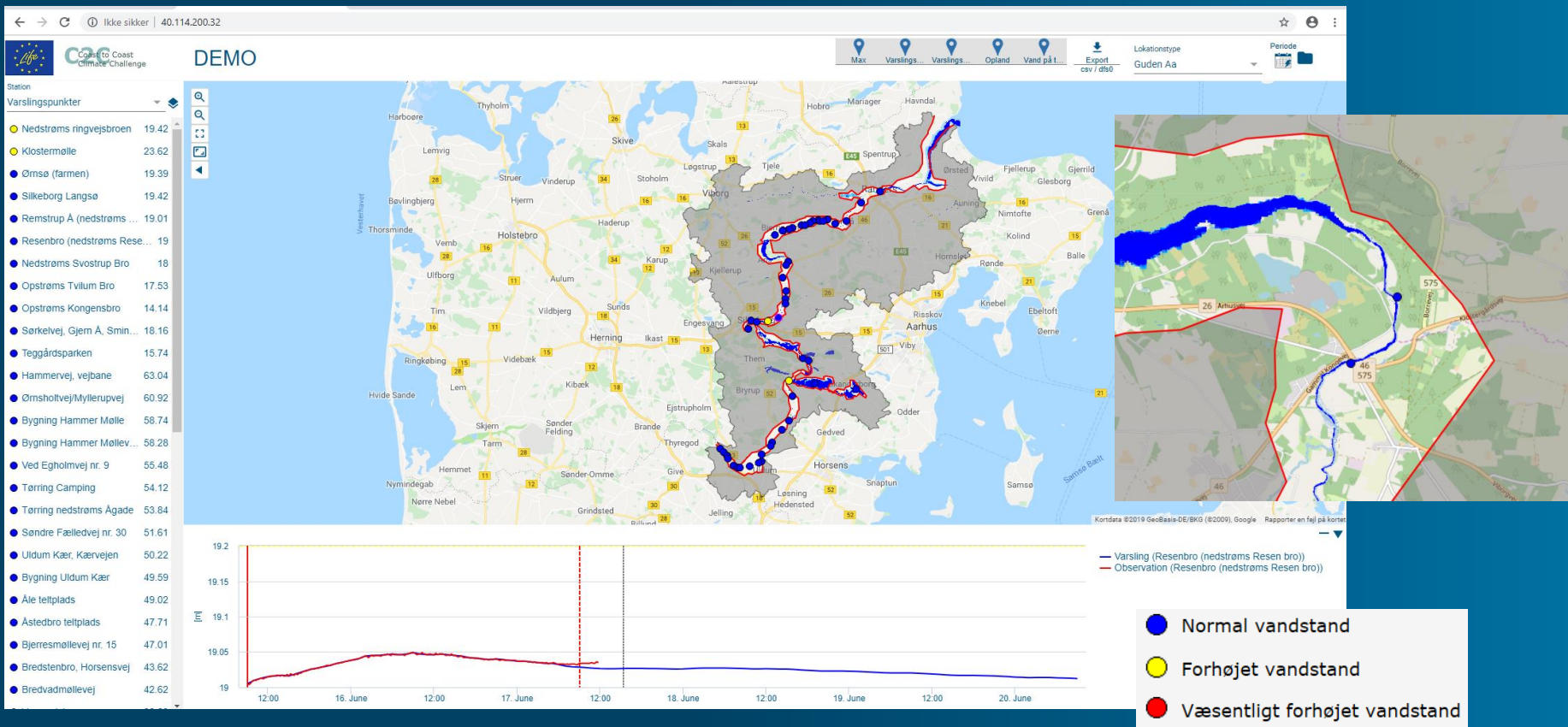
Station	Vandløb	Sted
21.62	Gudenaa	Møllerup
21.131	Gudenaa	Uldum Kær
21.02	Gudenaa	Aastedbro
21.142	Gudenaa	Bredstenbro
21.4	Gudenaa	Voervadsbro
21.54	Gudenaa	Klostermølle
21.27	Salten Aa	Rye Bro
21.46	Taaning Aa	Fuldbro Mølle
21.133	Illerup Aa	Mossø
21.132	Skanderborg Sø	Skanderborg
21.5	Gudenaa	Rye Mølle OS
21.135	Gudenaa	Rye Mølle OS
21.35	Knudaa	Bensmøllevad bro
21.145	Julsø	Svejbæklund
21.121	Brassø	Assing hoved
21.119	Ørnsø	Nordøst
21.51	Gudenaa	Silkeborg papirfabrik
21.118	Silkeborg Langsø	Vest
21.122	Silkeborg Langsø	Øst
21.109	Gudenaa	Resenbro
21.01	Gudenaa	Tvilumbro
21.11	Gudenaa	Kongensbro
21.128	Gudenaa	Borraa
21.123	Tange Sø	Ans
21.07	Gudenaa	Bjerringbro
21.09	Gudenaa	Ulstrup
21.08	Gudenaa	Langaa
21.112	Gudenaa	Randers havn
21.151	Gudenaa	Randers Bro
21.116	Randers Fjord	Udbyhøj
21.31	Nørre Å	Ålum

Vejrprognose data

Yr.no – timeværdier for nedbør de kommende 3 dage



Gudenå varslingsmodel



Klimatilpasningsscenarier

Målsætning

- Hvor ofte må oversvømmelse forekomme, $T = x$ år ?
- Modsvare meromkostninger ved klimaændring anno 20xx ?
- Reduktion af øget oversvømmelsesrisiko til givet niveau

Fokusområder

- Lokaliteter med oversvømmelsesproblemer

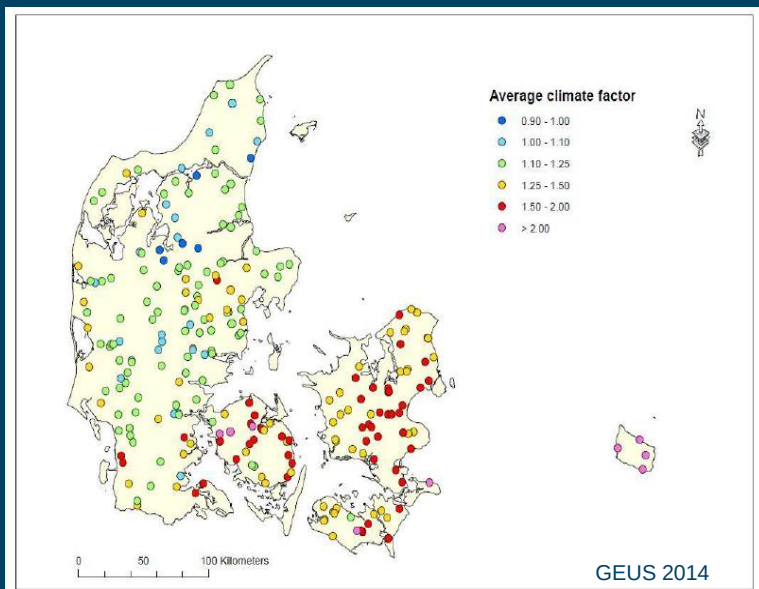
Jvf. EU-ansøgning – Overordnet potentiale for typer klimatilpasningstiltag

Baseline, CC 2050, CCmax 2050

Baseline – sammenligningsgrundlag, nuværende klima, uden klimatilpasning

CC 2050 – ”middel” klimaændring anno 2050, uden klimatilpasning

CC 2050 – ”øvre” klimaændring anno 2050, uden klimatilpasning

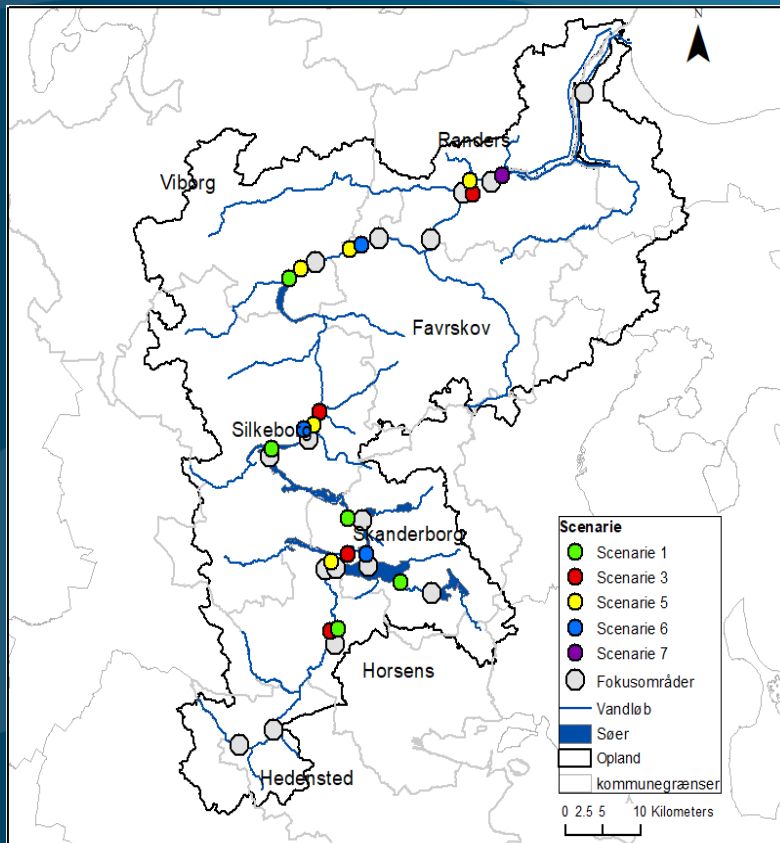
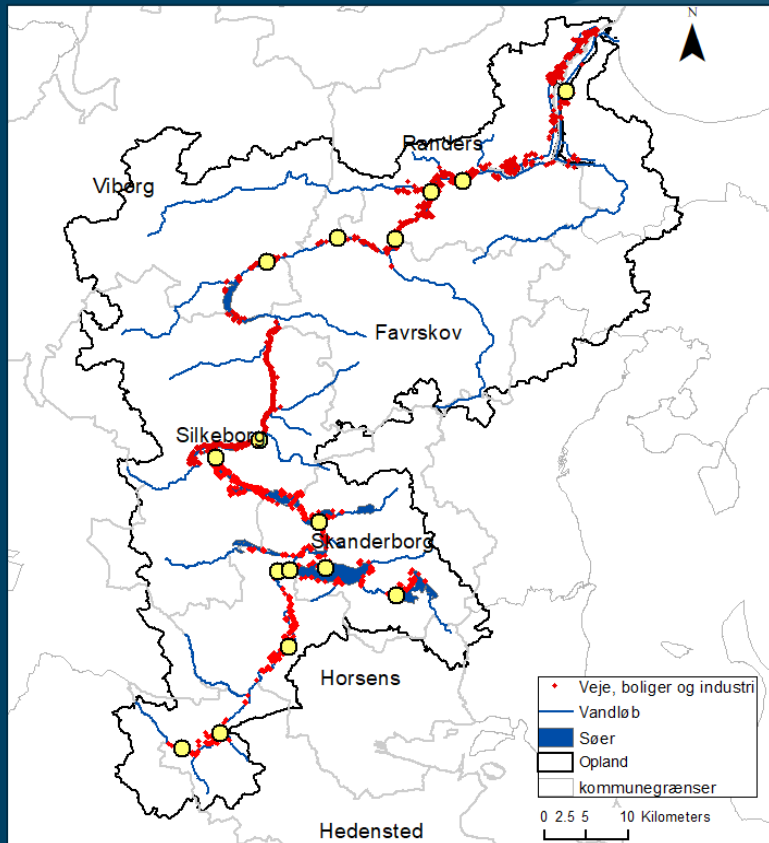


Station	Åstedbro	Voervadsbro	Tvilum	Stationsmiddel
T=5år : Middel	1,17	1,17	1,17	1,17
T=5år : Maks.	1,52	1,59	1,62	1,58
T=10år : Middel	1,17	1,13	1,15	1,15
T=10år : Maks.	1,53	1,52	1,56	1,54
T=20år : Middel	1,16	1,11	1,12	1,13
T=20år : Maks.	1,52	1,46	1,56	1,50
T=50år : Middel	1,14	1,09	1,10	1,11
T=50år : Maks.	1,39	1,35	1,46	1,40
T=100år : Middel	1,13	1,09	1,10	1,11
T=100år : Maks.	1,44	1,38	1,38	1,40

Klimatilpasningsscenarier - oversigt

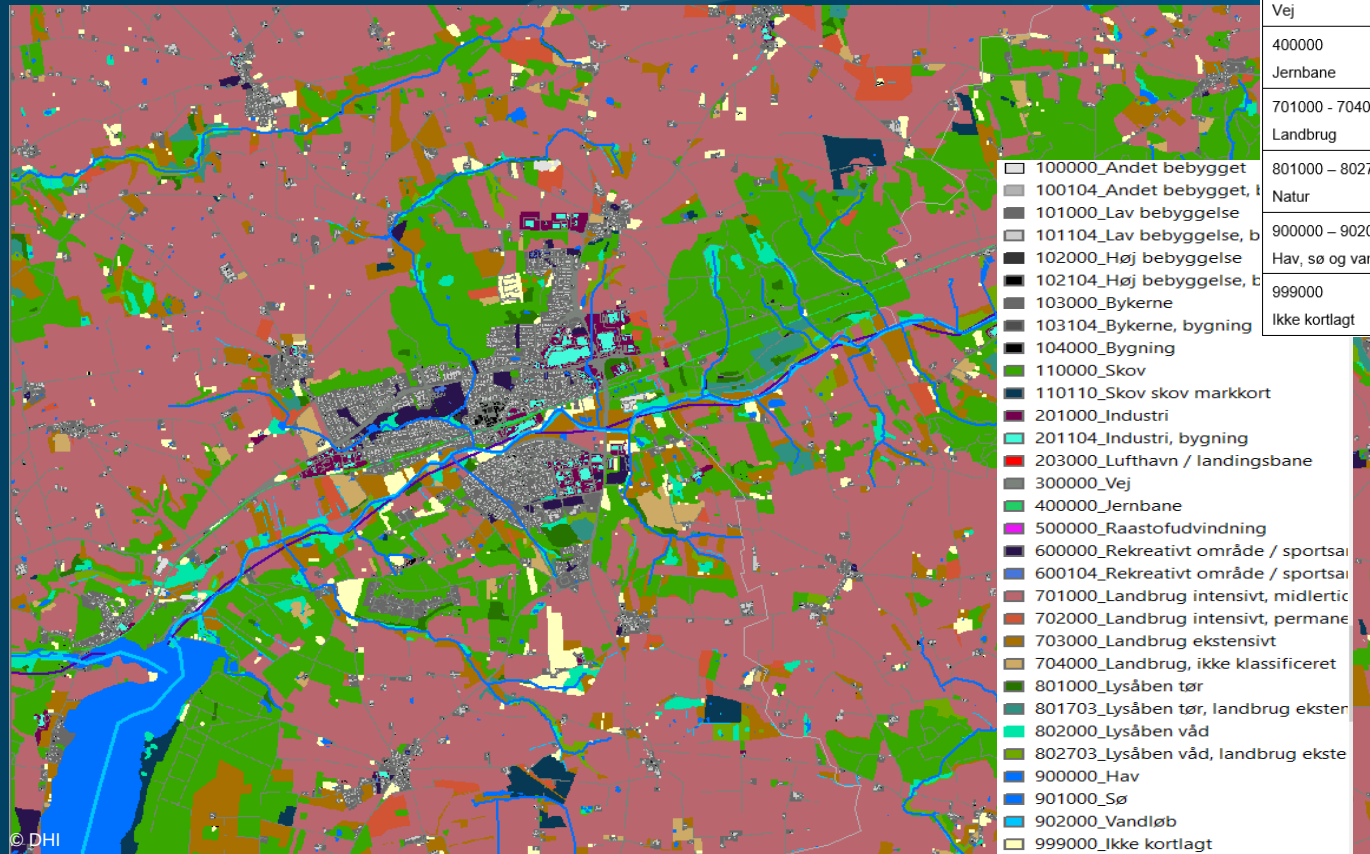
Scenarie	Beskrivelse
Baseline	Baseline beskriver den nuværende Gudenå, henholdsvis med nuværende og 2050 klima (middel faktor), dvs. klimafaktor: 1.11-1.17. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 1 Søparkering	Scenarie 1 beskriver effekten af vandstands-reguleringer med henblik på at udnytte søernes opmagasineringsvolumen ved maksimal vandføring. Beregnet for 2050 klima (middel faktor), dvs. klimafaktor: 1.11-1.17. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 2 Grødeskæring	Scenarie 2 vedrørende grødeskæring beskriver effekt af grødeskæringer, hvilket sker i sommer-halvåret. Output er tiddserier for vandspejlskote og vandføring for udvalgt periode.
Scenarie 3 Uddybning af Gudenå	Scenarie 3 ser på effekten af uddybning af åløbet på udvalgte strækninger. Beregnet for 2050 klima (middel faktor), dvs. klimafaktor: 1.11-1.17. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 4 Jordkøb, jordfordeling og høj klimafaktor	Scenarie 4 ser på baseline med prognose for maksimum klimaændring 2050 (maksimum klimafaktor), dvs. 1.40-1.58. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 5 Vandparkering i Gudenådalen	Scenarie 5 omhandler vandparkering (kontrolleret oversvømmelse) med arealer/volumen indlagt på strækninger. Beregnet for 2050 klima (middel faktor), dvs. klimafaktor: 1.11-1.17. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 6 Parallelløb	Scenarie 6 inkluderer parallelløb til Gudenå på udvalgte strækninger. Beregnet for 2050 klima (middel faktor), dvs. klimafaktor: 1.11-1.17. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 7 Aflejringer i nedre Gudenå	Scenarie 7 ser på effekt af aflejringer i nedstrøms del af Gudenå, ved Randers. Beregnet for 2050 klima (middel faktor), dvs. klimafaktor: 1.11-1.17. Output er T=5-100 års sandsynligheds- og risikokort.
Scenarie 8 Forsinket afstrømning fra byer	Scenarie 8 belyser effekten af at tilbageholde og forsinke afstrømningen fra byer til Gudenå.

Scenarier og fokuspunkter



Arealanvendelses- og værdikort

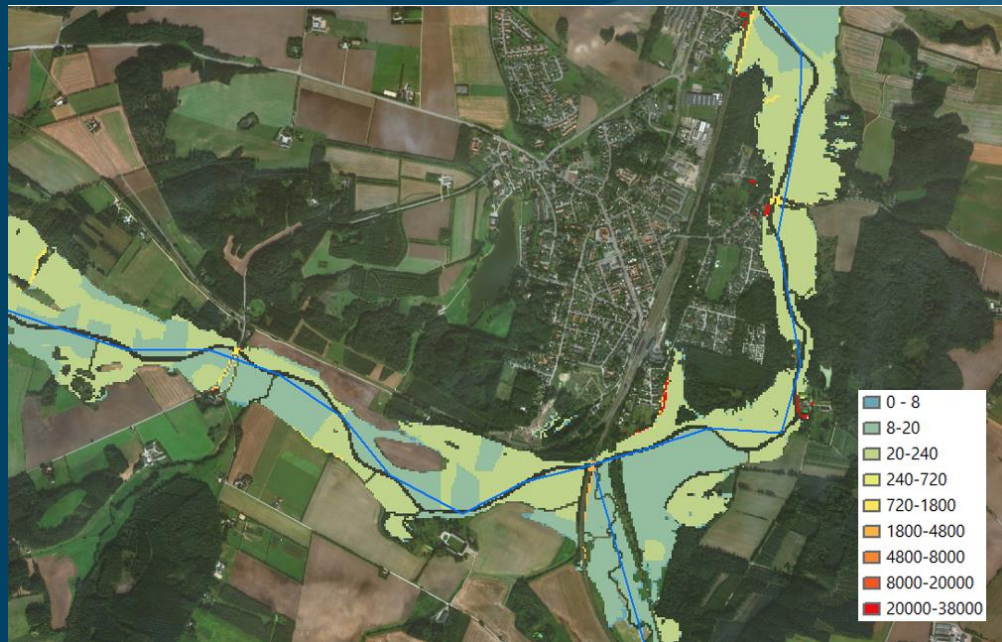
Basemap, DCE 2016, 10 m (Bjerringbro udsnit)



BaseMap kode/ID	Anvendelse	Værdi (kr/m ²)
100000 - 104000 Bebygget, bygninger, bykerne	Boliger	600
201000 – 201104 Industri, bygninger	Industri og handel	1000
300000 Vej	Sekundære trafikveje	30
400000 Jernbane	Jernbane	90
701000 - 704000 Landbrug	Landbrug	0,55
801000 – 802703 Natur	Natur	1
900000 – 902000 Hav, sø og vandløb	Ingen	0
999000 Ikke kortlagt	Ukendt	0

Jvf. Region Midt 2013

Risikokort



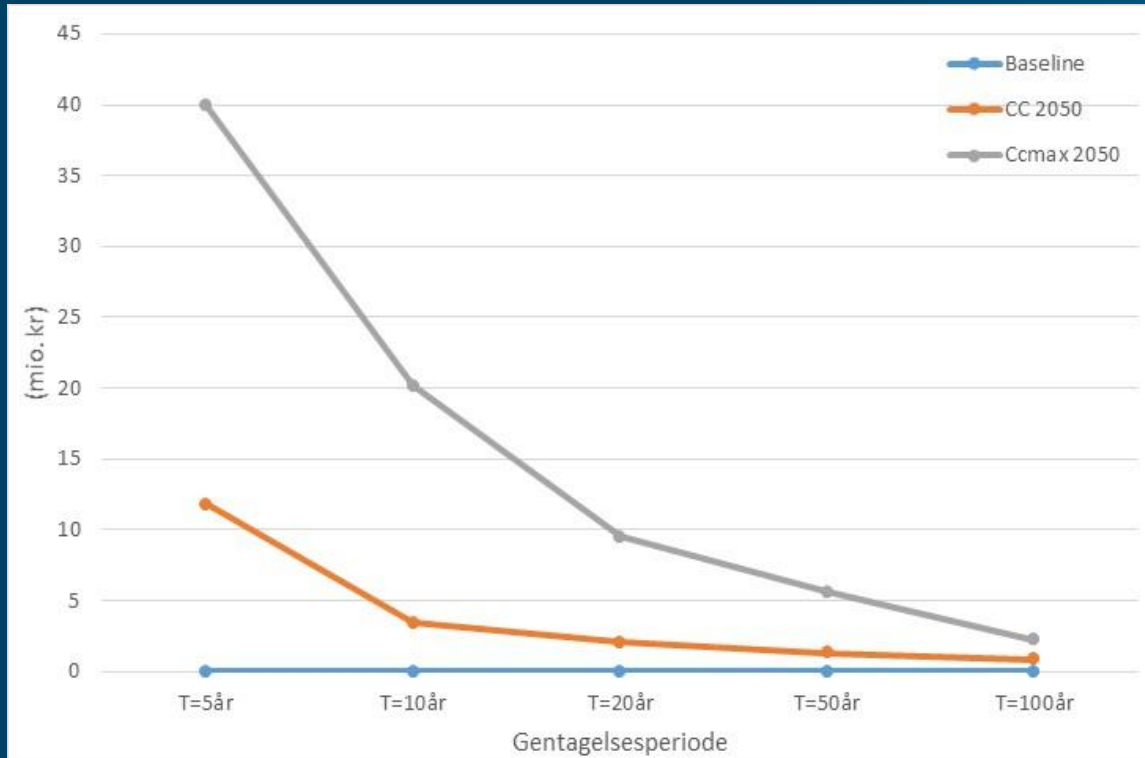
Langå udsnit

$$R=p*V$$

© DHI Riskokort, dvs. skadesomkostninger ved oversvømmelse (kr/år)

Gudenå tabsberegning - udgangspunkt

Meromkostning (kr/år), iberegnet sandsynlighed



Estimeret meromkostning (kr/år),

CC 2050 : ca. 20 mio

CCmax 2050 : ca. 80 mio

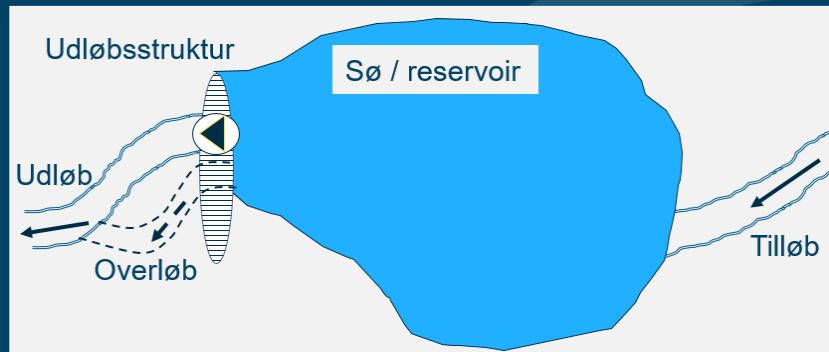
Største omkostninger for
T= 5 års hændelser

Berørte arealer :

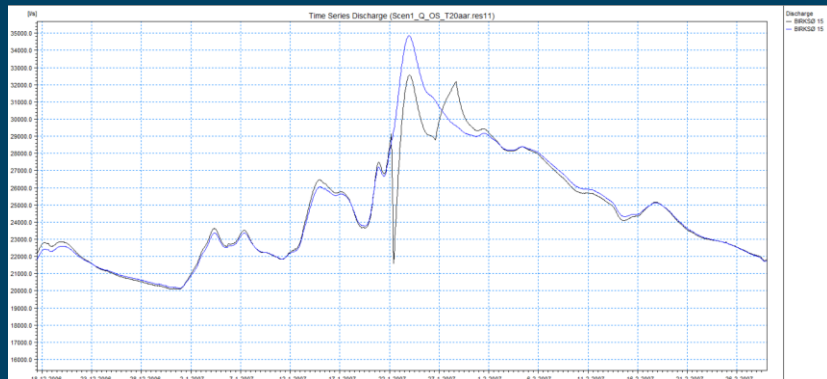
	% OS	% NS	% Total
Landbrug	9.2	55.0	40.0
Natur	86.7	42.0	56.7
Veje	2.0	2.2	2.2
Boliger	2.1	0.7	1.1
Industri& erhverv	0.0	0.1	0.1

Scenarie 1 : Søparkering

Midlertidig opmagasinering i søer ved regulering



Bygværk	Permanent eller midlertidig sænkning	Min vandstand	Max. vandstand
Bredvad Sø	70 cm	38.6	42.30
Skanderborg Sø, Fuldbro Mølle	30 cm	22.99	23.29
Ry Mølle	30 cm	22.18	22.48
Silkeborg	20 cm	20.71	20.91
Tange Sø	50 cm	13.10	13.60



	Nedstrøms (cm)
Bredvad Sø	0 cm
Fuldbro Mølle	-8 cm
Ry Mølle	-5 cm
Silkeborg	-3 cm
Tange Sø	-9 cm

Anslået reduceret oversvømmelsesrisiko : ca. 30 mio. kr/år

Scenarier 1 : Søparkering

- Udnytter naturgivne forhold
- Udnytter eksisterende bygværker
- Yderligere potentiale koordineret styring / samstyring, opstrøms – nedstrøms
- Mere end opvejer negative effekter af klimaændring
- God effekt, relativt lave omkostninger

Scenarie 2 : Grødeskæring

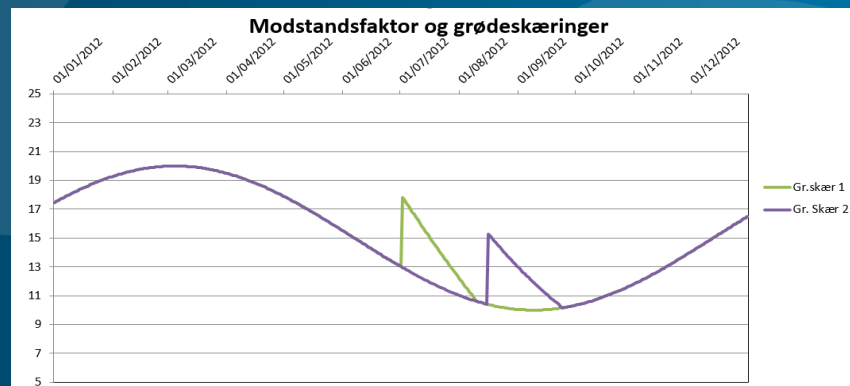
Forudsætninger

- Ekstraordinære grødeskæring sker samtidig for opstrøms/nedstrøms Gudenå (120 km)
- I scenariet antages grødeskæring i fuld bredde , hvilket er estimeret til et Manning tal på $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ umiddelbart efter skæring
- På grund af genvækst af grøde antages Manningtallet at falde tilbage på de anvendte Manningtalskurver efter 3 uger.

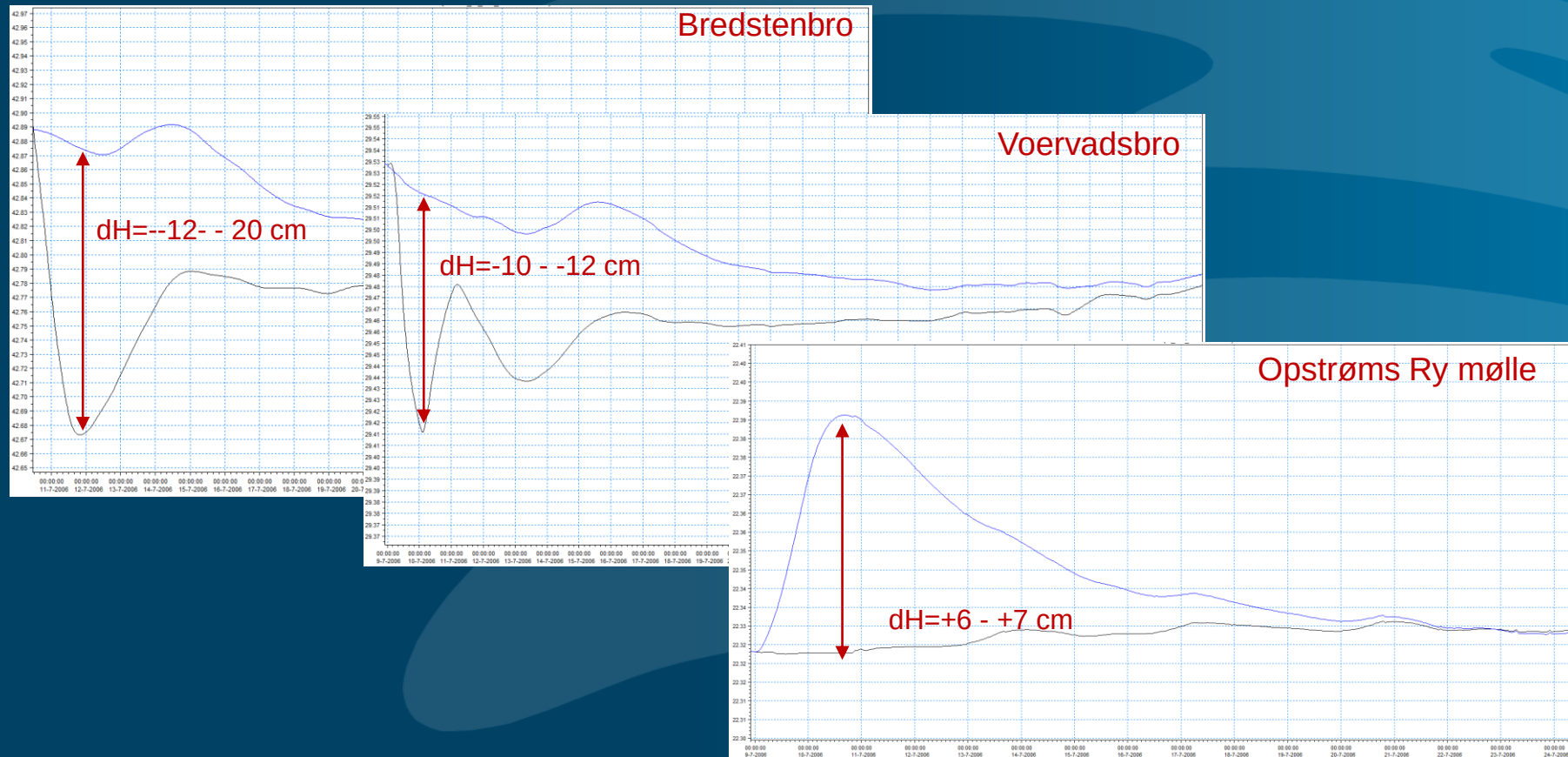
Skæringsdatoer : 10 juli /29 sept

Genvækst (dage) : 21

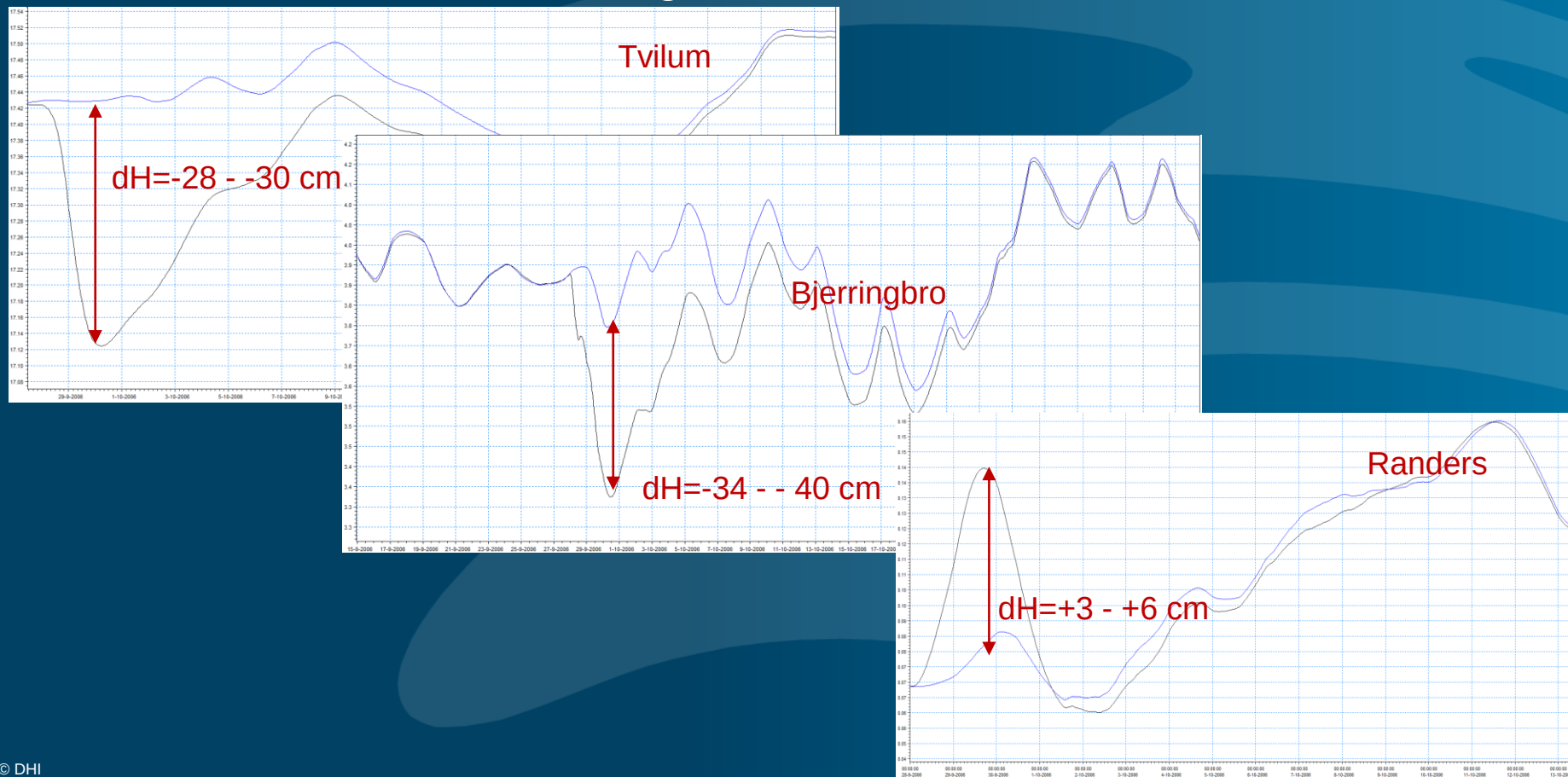
M efter skæring : 20



Scenarier 2 : Grødeskæring



Scenarier 2 : Grødeskæring



Scenarier 2 : Grødeskæring

Før og efter grønnskæring, nord for Svostrup



Berørt af oversvømmelse : 80-90 % naturområder

Værdierne repræsenteret på de arealer der kan (midlertidigt) tørlægges ved 120 kms
grønnskæring : ca. 5 mio kr (usikkerhed vedr. værdi for landbrugs- kontra naturarealer)

Scenarier 2 : Grødeskæring

- Forudsætter samtidig grønnskæring på ca 120 km vandløbsstrækning
- På strækninger med grønnskæring giver ændret M-tal kortvarig vandstandsænkning på 12-40 cm på den samtidige grønnskæringsdato
- På strækninger nedstrøms grønnskæring ses kortvarig hævet vandstand fra ca. 5-7 cm ved Ry og ca. 3-6 cm ved Randers
- Reducerer midlertidigt oversvømmelse
- Nytteværdi meget afhængigt af omkostninger for naturearealer
- Kan grønnskæring times og være et middel til klimatilpasning ?

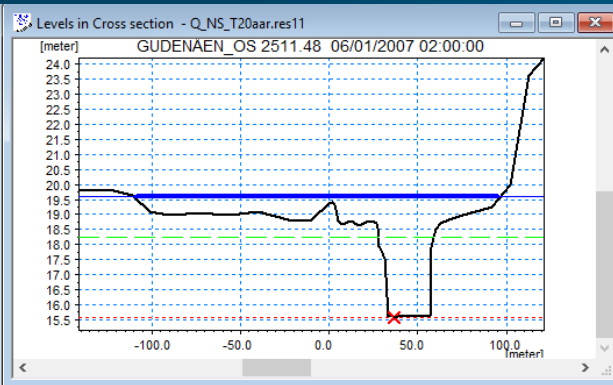
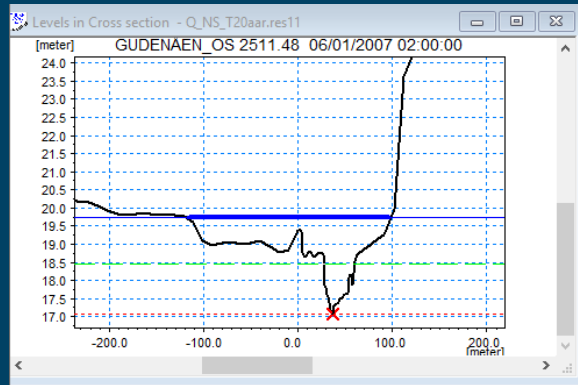
Scenarier 3 : Uddybning

Øget hydraulisk kapacitet af Gudenå ved fjernelse af sedimentaflejringer og uddybning af vandløbstværsnit

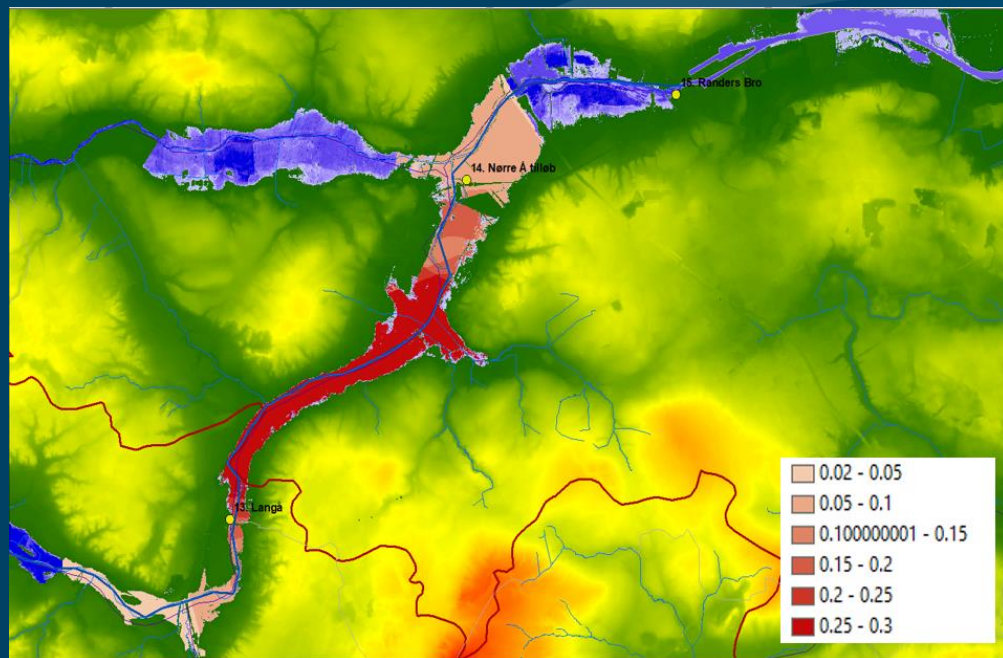
Vandløbsstrækning	Øget dybde	Øget bredde
Gudenå (Horsens K.) Bredvad Mølle Gudenå-Bredstenbro-Vestbirk Camping st 9189	50 cm til kote 42.0 m	
Gudenå (Horsens K.) Bredvad Mølle – Nedstrøms Bredvad Sø Gudenå-Bredstenbro-Vestbirk Camping st. 9189 m VestbirkBredvadSø st. 11023 m	150 cm til kote 38.5 m	
Gudenå fra Mossø til Gudensø Profiler: 23, 101, 884, 998, 1389, 1463, 1930, 2672, 2677 Mossø_2_Gudensø	Til kote 20.80 dvr90	
Gudenå (Silkeborg K.) Udløb af Silkeborg Langsø – Resenbro Gudenåen_OS st. 134 m - Gudenåen_OS st. 3061 m	Dobbelt dybde	Dobbelt bredde

Gudenå (Randers K.) Nørreå tilløb – Motorvejsbro Gudenå st.32.000-34.000 Gudenåen_NS st 32000 Gudenåen_NS st 34000	Til kote – 2.0 m	50 m
Gudenå (Randers K.) Motorvejsbro – Randers Bro Gudenå st. 34.000-37.200 Gudenåen_NS st 34000 Gudenåen_NS st 37200	Til kote – 2.5 m	
Gudenå (Randers K.) Motorvejsbro – Randers Bro Gudenå st. 36.000-36.500 Gudenåen_NS st 36000 Gudenåen_NS st 36500		50 m
Gudenå (Randers K.) Randers Havn Pieren Rander Fjord st 1400	Til kote – 7.0 m	

Scenarier 3 : Uddybning



Scenarier 3 : Uddybning



Lokalitet	dH (cm)
Bredvad Mølle	-10
Ry Mølle	0
Silkeborg Langsø	-14
Langå	-25
Randers (ops.motorvejsbro)	-12

Scenarier 3 : Uddybning

- Uddybning ved Bredvad Sø, Silkeborg og Randers har tydelig effekt på opstrøms vandstand men ringe effekt på nedstrøms forhold
- Uddybning imellem Mossø og Gudensø har ringe effekt på både vandstand
- Uddybning giver lokale forbedringer (sænker tærskel) uden nedstrøms negative/positive effekter
- Anslået reduktion af oversvømmelsesrisiko (2050) : 16 mio kr/år
- Anslået omfang og omkostning : 270000 m³, > 30 mio kr

Scenarier 4 : Klimaændring, høj faktor, jordkøb/jordfordeling

Klimaændringers effekt på ekstremvandføringer ($T=5-100$ år) fremskrives (2050) efter :

Øvrige scenarier benytter "middel"

Scenarie 4 benytter "øvre" (worst case)

- Oversvømmet areal mere end fordobles ved "høj" kontra "middel" faktor
- Kan bruges til at illustrere maksimale CC konsekvenser, men skal nok ikke bruges i planlægning
- CCmax risikokort, $T=5-100$ år beregnet

Scenarier 4 : Jordkøb / klimaændring, høj faktor

Klimatilpasning ved jordkøb eller jordfordeling for landbrugsjord

Ca. 90 ha landbrugsjord bliver hyppigt oversvømmet p.gra. Klimaændringer
Hertil kommer naturområder (med mulig landbrugsmæssig anvendelse)

Antages 50 % jordkøb og 50 % omfordeling af 90 ha med priser på hhv.
150000 kr/ha og 5000-9000 kr/ha. www.landbrugsinfo.dk vil det anslået
beløbe sig i 7,0 mio kr.

Jvf. risikokort vil oversvømmelse på landbrugsjord beløbe sig til 5500 kr/ha.

Scenarier 5 : Ådalsparkering

Opmagasineret i Gudenådal (kontrolleret).

Ådal i forvejen er (ukontrolleret) oversvømmet ved store afstrømningshændelser.

Vandløbsstrækning	Volumen (m3)
Horsens kommune Ved Klostermølle Mossø_2_Gudensø ch. 22.71 – 101.37	300,000
Silkeborg kommune Silkeborg – Kongens Bro (ved Gjern å tilløb) GUDEAEN_OS ch 7700 – 8100	350,000
Viborg Kommune Kongensbro – Bjerringbro Midt på strækning GUDENAEN_NS ch. 2198 – 2500	400,000
Favrskov kommune Bjerringbro-Ulstrup GUDENAEN_NS ch. 22268 – 22269 (ved Lilleå tilløb)	250,000
Randers Kommune Langå-Randers GUDENAEN_NS ch. 32777 – 33060 (ved Nørreå tilløb)	700,000

Scenarier 5 : Ådalsparkering

Svært at finde egnede, ikke oversvømmede arealer i Gudenådalen

Kan kræve fysiske anlæg for at opmagasinere yderligere volumener i.f.t. i dag (f.eks. diger)

Begrænset effekt

Ådal i forvejen er (ukontrolleret) oversvømmet ved store afstrømningshændelser.

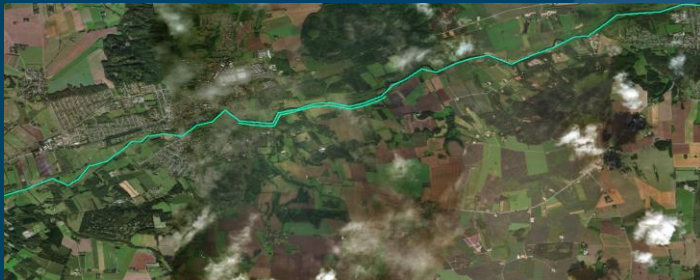
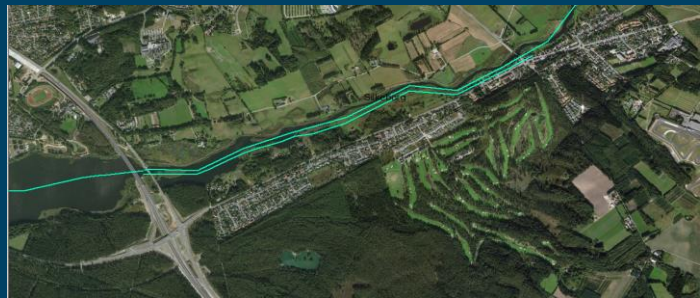
Ikke oplagt alternativ under de givne forudsætninger

Scenarier 6 : Parallelløb

Øget kapacitet på udvalgte strækninger ved parallelløb

Vandløbsstrækning	
Gudenå (Skanderborg K.), Mossø til Gudensø. Parallelt løb. Munkekanalen re-etableres: Indløb Mossø. St. 780 St. 940.	Bundkote 22,30-22,80 m, bundbredde 8-10 m, anlæg 1:2 Bundkote 22,0-22,60 m bundbredde 8-10 m, anlæg 1:2 Bundkote 22,10-22,40, bundbredde 8-10 m, anlæg 1:2
Gudenå (Silkeborg K.) Udløb af Silkeborg Langsø – Resenbro Gudenåen_OS st. 134 m - Gudenåen_OS st. 3061 m	Parallelløb af samme dimension som hovedløb
Gudenå (Favrskov og Viborg K.), Bjerringbro-Ulstrup (2,5 km) Gudenåen_NS st.6085 – Gudenåen_NS st.6085	Bundkote ca. lig med Gudenå bredkote minus 0.5 m. Bredde ca. 30 meter

Scenarier 6 : Parallelløb



	Max. dH (cm)
Mossø	-6
Gudensø	+1
Silkeborg Langsø	-30
Ved Resenbro	+0.5
Ved Bjerringbro	-5
Ved Ulstrup	0

Scenarier 6 : Parallelløb

- Parallelløb kan give betydelige lokale reduktioner i vandstand og oversvømmelsesrisiko
- Meget begrænsede nedstrøms negative effekter
- Størst effekt ved Silkeborg Langsø – Resenbro
- Anslået reduktion i oversvømmelsesrisiko : 18 mio kr / år
- Overslag for omkostninger, > 36 mio kr (usikkert)

Scenarier 7 : Aflejring

Ophør af vedligeholdelse ved, havn og sejlrende, Randers

Opbygning af aflejring nedsætter hydraulisk kapacitet og øger risiko

Vandløbsstrækning	Bundkote (m)
Gudenå (Randers K.)	
Randers Bro – Randers Havn Pieren	
Gudenå st. 36.500 - 38.000 m	
Rander Fjord st 0 – 1400 m	-2,0 m
	-3,0 - -4.0 m

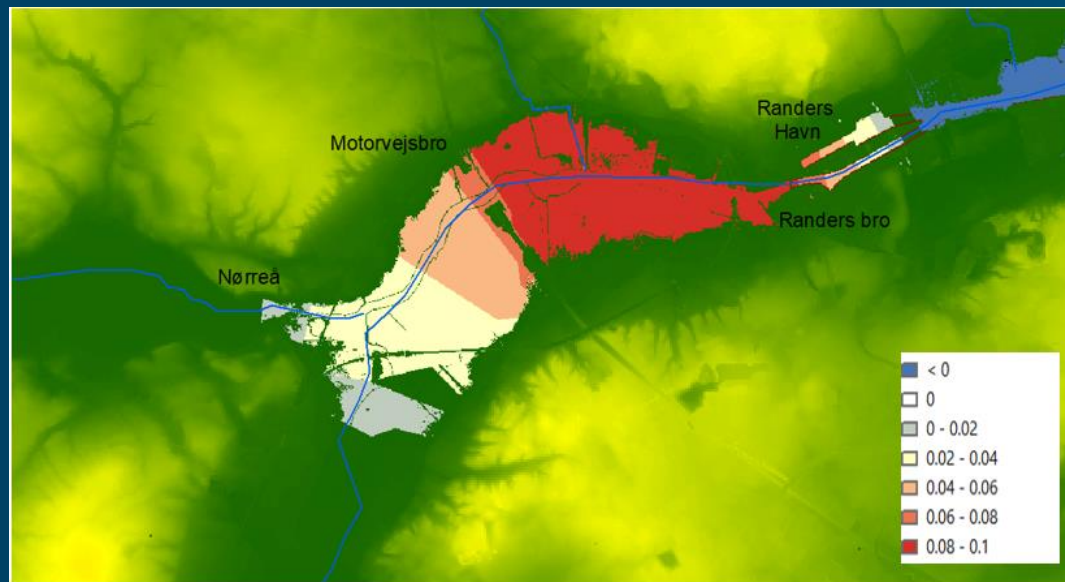
Scenarier 7 : Aflejring

Op til 9 cm øget vandstand ved T=20 år (Motorvejsbro – Randers Bro)

Effekt aftager opstrøms til ca. nul ved Nørreås tilløb

Øget oversvømmelsesrisiko (ca. 0,25 mio kr/år)

Ikke et klimatilpasningstiltag, men risiko tage højde for



Scenarier 8 : Forsinket afstrømning fra byer

Afstrømning fra befæstede arealer forsinkes/udjævnes i f.eks. regnvandsbassiner

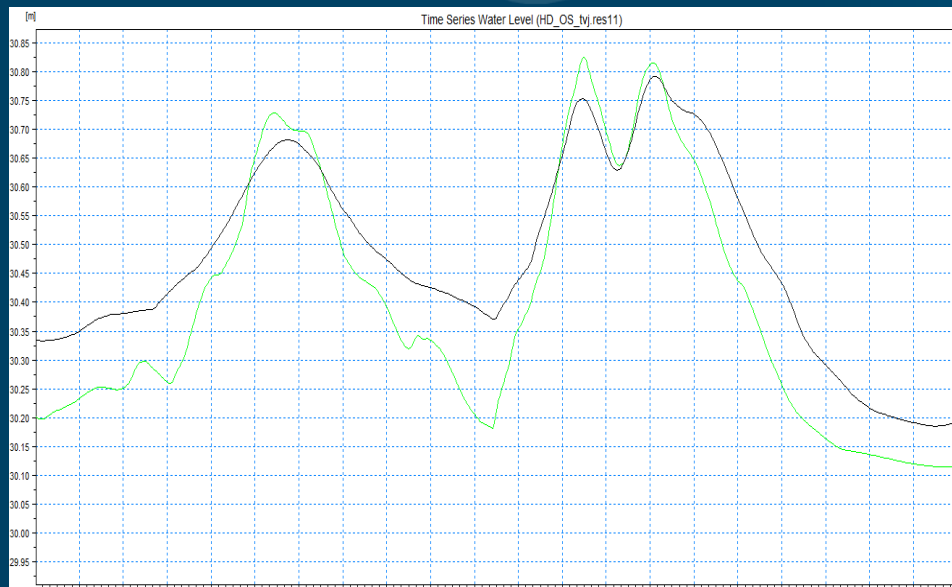
Kan kun beskrives tillempet v.hj.a. modellen – indeholder ikke afløbs- og regnvandsudledningssystemer.

Forsøgt tilnærmet ved at justere overordnet tidkonstant for afstrømning.

Tidskonstant baseline (s^{-1})	Tidskonstant scenarie (s^{-1})	Middel afstrømningstid baseline (timer)	Middel afstrømningstid scenarie (timer)
$1e^{-5}$	$5e^{-6}$	28 timer	55 timer

Scenarier 8 : Forsinket afstrømning fra byer

H-tidsserie ved maks. (Voervadsbro), Scenarie 8 (sort linie)



Begrænset effekt på større Gudenå skala

Dobbelt så høj opholdstid/forsinkelse svarer i princippet til fordoblet regvandsbassinvolumen (nuværende total for Gudenå opland ukendt).

Peger i retning af begrænset effekt med høj omkostning.

Scenarier

Analyse viser at:

1. Klimatilpasning i forhold til T=5-10 års hændelser giver størst reduktion i oversvømmelsesrisiko. Bør tages i betragtning ved formulering af målsætning
2. Der kan på de foreliggende grundlag forventes stigende udgifter til oversvømmelseskader. CC 2050 : ca.20 mio kr/år, CCmax 2050 ca.80 mio kr/år.
3. Øget oversvømmelsesrisiko p.g.r.a. klimaændringer (2050) kan elimineres ved brug af klimatiltag
4. Der optræder strækningsvis både positive og negative effekter af klimatiltag for Gudenå – bør ikke vurderes isoleret
5. Ud fra anslåede effekter og omkostninger er der potentiale for søparkering, parallelløb, uddybning og jordkøb/jordfordeling.
6. Skal nøje vurderes bl.a. i.f.t. Miljølovgivning ved skitseprojektering samt andre barrierer !

Fremadrettet

1. Målsætning for Gudenå klimatilpasning bør formuleres
2. Overordnet Gudenå analyse – videre arbejde med projekter / tiltag
3. Gudenå vandløbsmodel udviklet til at analysere opstrøms-nedstrøms effekt – nyttig som del af helhedsplan
4. Skitseprojekter, evt. med elementer fra scenarier, opstilles med evaluering af miljø og økonomi
5. Gudenå metode med reference til Vejledning til Klimatilpasning og risikokort anbefales videreført – link til den øvrige klimatilpasning
6. Varsling supplerer klimatilpasning – når oversvømmelse er under udvikling. Bliver fortsat testet over kommende periode.