

Når havet kommer nedefra, Juelsminde

I fremtiden forventes stigende havniveau og flere kraftige storme. I Juelsminde, en lavtliggende kystby, sikrer man sig med diger imod direkte oversvømmelser fra havet. En sandet undergrund tillader dog passage under diget så havet kan få grundvandet til at stige og oversvømme byen nedefra. Artiklen præsenterer en undersøgelse af sammenhængen imellem havniveau og grundvandsstand.

HENRIETTE HØJMARK HANSEN, RONJA CEDERGREEN FORCHHAMMER, ANNA BONDO MEDHUS, THEIS RAASCHOU ANDERSEN & SØREN ERBS POULSEN

I Hedensted Kommune mellem Horsens og Vejle Fjord ligger Juelsminde. En by med godt 4000 indbyggere. Som så mange andre danske byer, er Juelsminde placeret ved kysten. Syd for havnen, kun hundrede meter fra kysten ligger et sommerhusområde. Både byen og sommerhusområdet ligger få meter over havets overflade på hævet sandet havbund fra Litorinahavet /1/. Kysten er en erosionskyst, hvor havet konstant ændrer kysttrækningen med en nordgående sedimenttransport /1/. Området er i risiko for oversvømmelse fra flere sider. Nedefra ved et stigende grundvandsspejl, ovenfra ved store nedbørsmængder og fra siden ved havniveaustigninger eks. ved stormhændelser.

Alene på baggrund af risikoen for oversvømmelse fra havet er Juelsminde udpeget af Naturstyrelsen og Kystdirektoratet som én af 10 byer i Danmark, der har et særligt behov for at reducere risikoen for omfattende skader med høje omkostninger/2/.

For at reducere risikoen for omfattende skader ved oversvømmelse har man i Juelsminde kombineret flere tiltag. De lavtliggende områder drænes til et lille vandløb, der løber gennem byen. Herfra pumpes vandet via et pumpehus ud i havet (Figur 1). Syd for havnen beskytter et dige sommerhusområdet mod oversvømmelse fra havet. Dige-kronen ligger i kote 2-2,50 (DVR90) /3/ og er designet til at kunne beskytte det bagvedliggende om-

råde mod de fleste havniveaustigninger (figur 1). Alligevel er der planer om at forhøje diget til minimum 2,5 m for at sikre beskyttelse imod 100-års hændelser /4/. Selvom diget kan beskytte mod direkte oversvømmelse kan områdets beboere dog stadig ikke vide sig sikre i

forhold til indirekte oversvømmelse fra havet.

Grundvandsstigninger ved højt havniveau

I perioder uden kraftig nedbør, men med forhøjet havvandstand, er der observeret



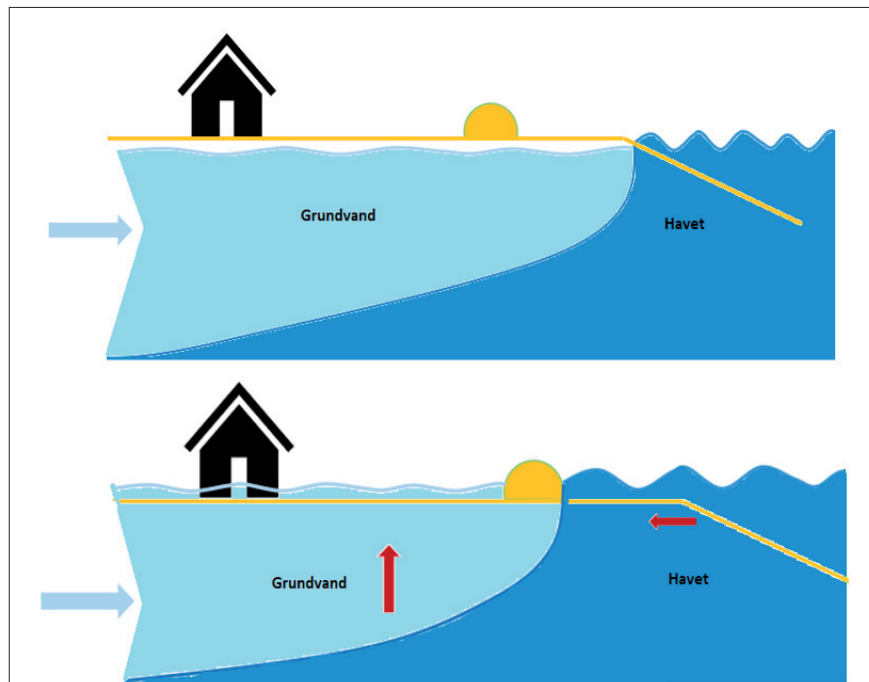
Figur 1: Kort over Juelsminde. Røde prikker viser loggerpositioner. Blå prikker viser positioner af hhv. havniveaulogger og nedbørssensor. Rød stiplede linje viser beliggenheden af diget, med pumpehuset markeret med gul firkant hvor vandet pumpes fra et drænende vandløb ud i havet.

Tabel 1: Placering og type af 7 loggere i Juelsminde.

Logger navn	Logger type	LAT	LONG	Afstand fra kyst
Logger 1:	Barometer logger	55,719466	9,997424	~ 139 m
Logger 2:	Grundvandslogger	55,719466	9,997424	~ 139 m
Logger 3:	Grundvandslogger	55,719519	9,997907	~ 101 m
Logger 4:	Grundvandslogger	55,719519	9,998589	~ 52,5 m
Logger 5:	Grundvandslogger	55,712096	10,01651	~ 210 m
Logger 6:	Grundvandslogger	55,712857	10,018334	~ 91 m
Logger 7:	Grundvandslogger	55,713039	10,019108	~ 45,5 m



Figur 2: Oversvømmelser på begge sider af diget – fra 9. maj 2021 – foto taget af Per Nørmark – Hedensted kommune



Figur 3: vandet presses op under landsiden af diget når havniveauet stiger. Dermed er der risiko for at grundvandet bliver presset op over terræn Øverst: Grundvandet strømmer ud i havet. Der ses normal grundvandsstand. Nederst: Havet stiger og trykket stiger imod grundvandet, som derfor stiger og evt. kan nå over terræn.

vand på terræn på landsiden af diget i Juelsminde, figur 2. Derfor blev der i 2017 iværksat undersøgelser for at evaluere truslen om oversvømmelser nedefra i relation til stigende havniveau.

Ud fra borer i området ved vi, at de øverste meter af undergrunden i Juelsminde består af sand.

Grundvandet strømmer fra land under diget og ud imod havet. Teorien er, at en forhøjet havvandstand presser grundvandet tilbage, hvorved det stiger op imod overfladen, Figur 3. For at verificere teorien og undersøge sammenhængene yderligere er loggere installeret i området.

Dataopsamling og metode

I regi af C2C-CC projektet (<https://www.c2ccc.eu/om-c2c-cc/>) har VIA University College siden 2017 haft 6 kystnære grundvandsloggere placeret i to profiler i Juelsminde i afstande imellem 45 og 210m fra kysten. De har registreret grundvandsstanden hvert 10. minut. Placeringen af loggerne kan ses på figur 1. Grundvandsdata bliver sammenholdt med data fra DMI, der har en havniveau logger i Juelsminde havn, der logger med samme frekvens som projektets loggere.

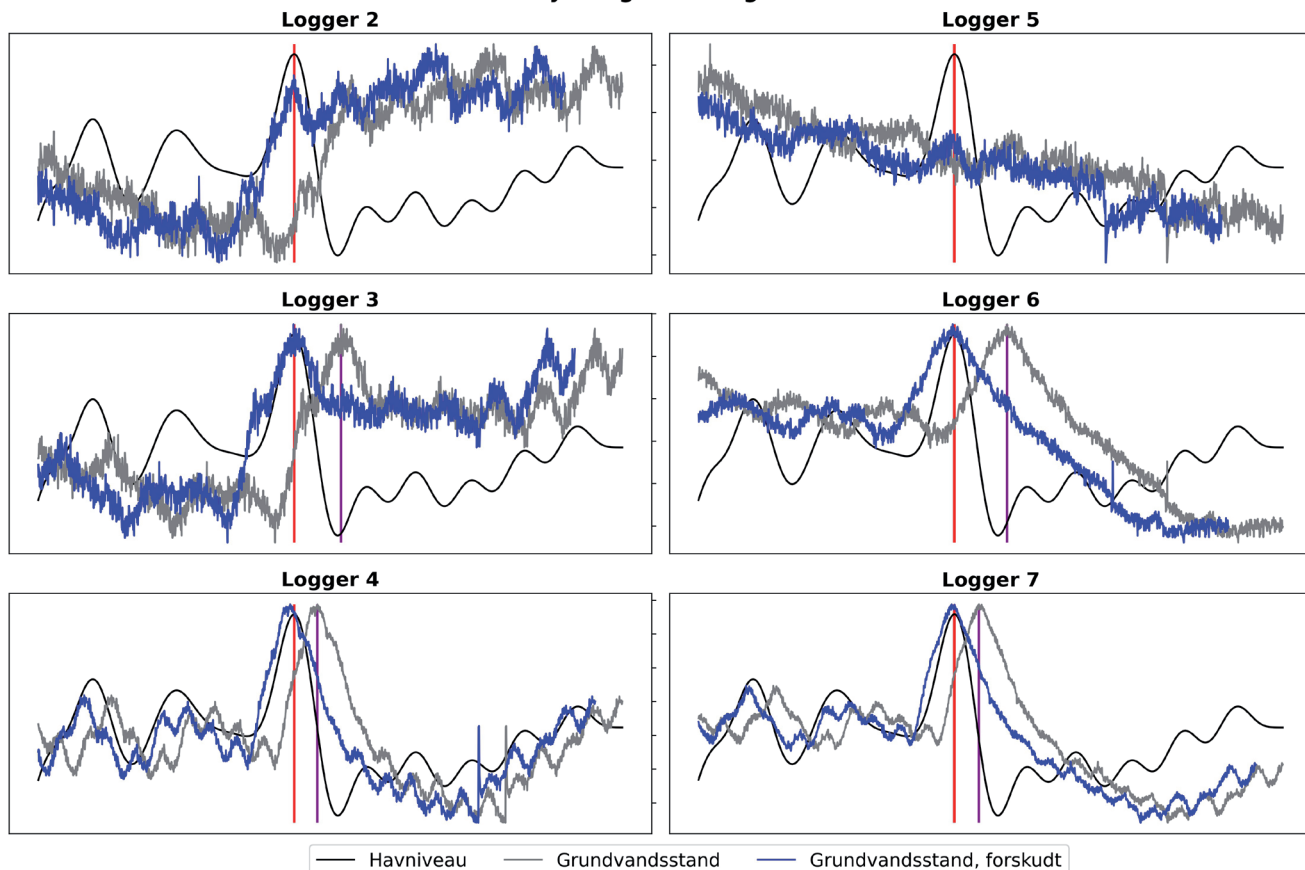
Studiet er udført i to etaper og støttet af EU LIFE, Engell-Friis fonden og INSERO. Først gennemførtes korrelationsundersøgelser for at kortlægge, hvordan ændringer i havniveauet påvirker det terrænnære grundvand. Det undersøgte hvor langt ind i landet, med hvilken forsinkelse og amplitudedæmpning en stigning af havniveauet påvirker grundvandsstanden. Efterfølgende anvendtes machine learning for at undersøge om det er muligt ud fra prognoser for havvandstand og nedbør samt aktuel vandstand i en logger at forudsige ændringer i grundvandsstanden.

Korrelationsundersøgelser af grundvandet

30 højvandsbegivenheder blev fundet ved et automatisk udtræk. En højvandsbegivenhed defineres her som situationer, hvor den relative havniveauændring (forskel imellem bølgebund og bølgetop) er over 1,2 m. Efterfølgende er der kørt et low-pass-filter over højvandsbegivenhederne, som bl.a. fjerner tidevandsudsving.

Forsinkelsen af stigningen i grundvandet i forhold til havniveauet er bestemt manuelt som tiden fra observation af toppunktet for havniveauet til toppunktet af stigningen i grundvandsstanden, se Figur 4. Figur 4 viser en tydelig top fra en højvandsbegivenhed, som ses i både havniveau-data og grundvandsloggerne. I flere andre

Faseforskydninger for begivenhed 20

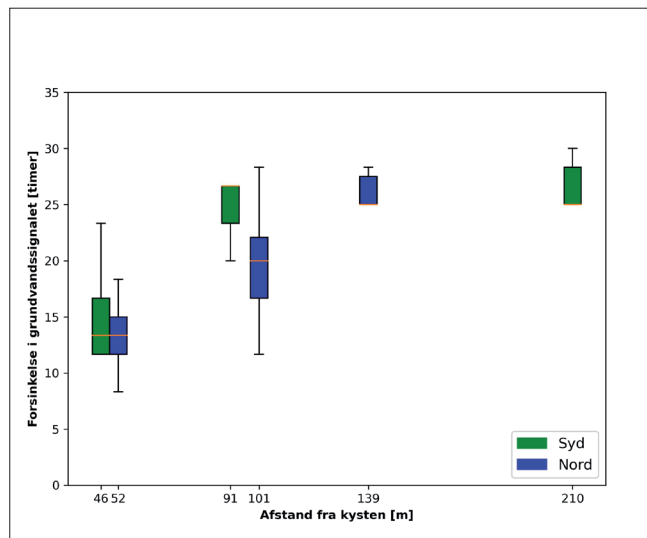


Figur 4: Eksempel på manuel bestemmelse af forsinkelsen af en havniveauøgning ind i land ved de 6 loggere. Sort: Havniveau. Lysegrå: Grundvandsstand. Blå: grundvandsstanden, forskudt med den manuelt aflæste forsinkelse således at toppunkterne, markeret med vertikal rød linje falder sammen for de to kurver.

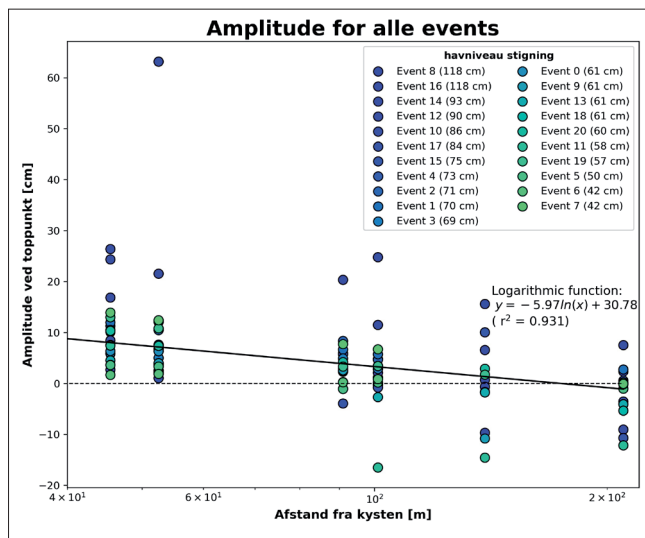
tilfælde har det ikke været muligt at bestemme forsinkelsen, da signal-støjforholdet i loggerdata ikke altid er højt nok til at genfinde, den top som ses i havloggeren. Det gælder specielt de loggere, som er placeret fjernest fra

kysten. I et homogent medium forventer vi at finde en lineær sammenhæng imellem afstand og tid for udbredelsen af en bølgetop /5/. Figur 5 viser et boxplot for de observerede forsinkelsestider ved loggerne. Loggerne langs

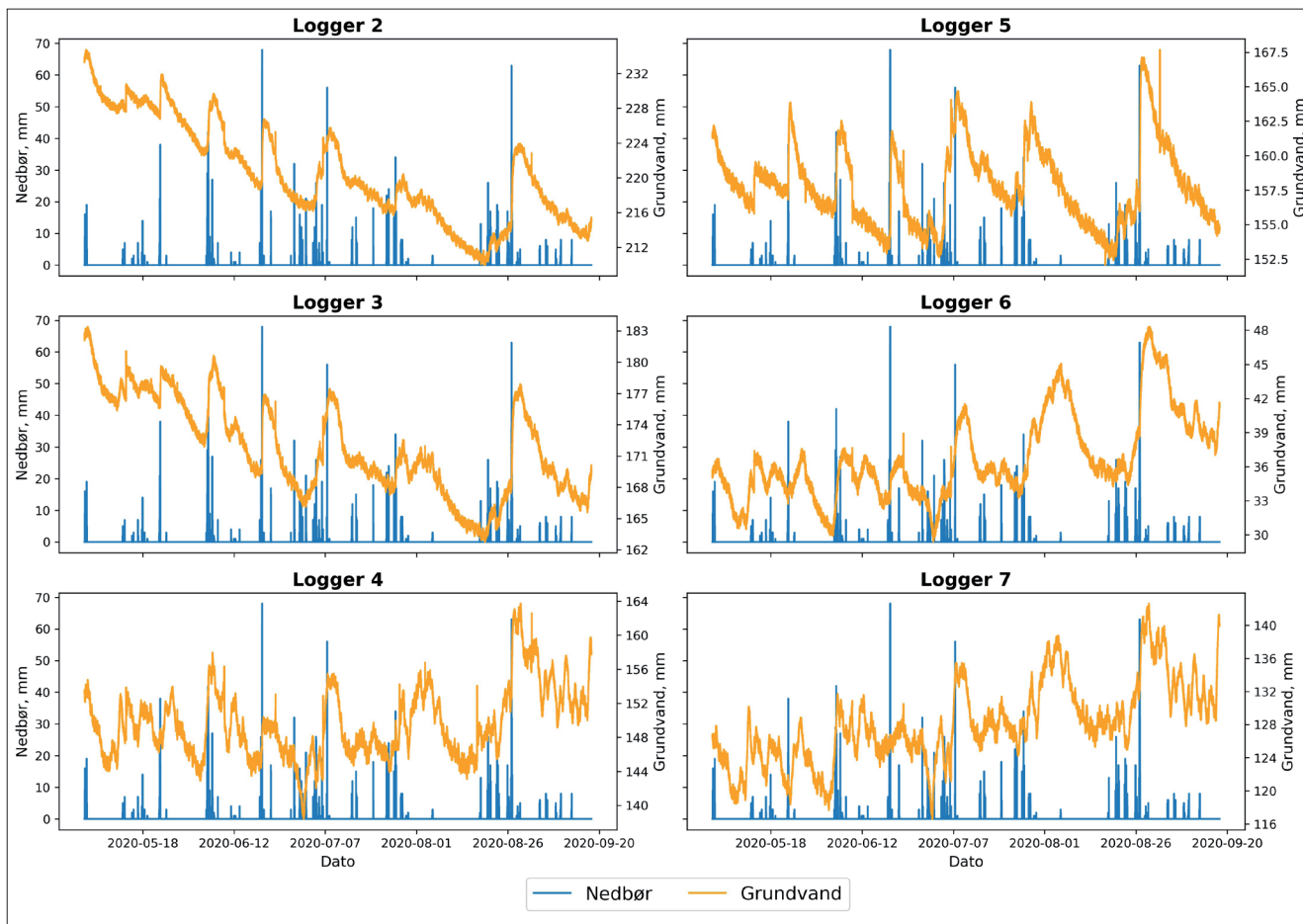
det nordlige profil, som ikke er forstyrret af dige og bebyggelser ser ud til at kunne repræsentere en lineær sammenhæng. De to mest kystnære positioner på det sydlige profil ser også ud til at passe rimeligt til tendensen



Figur 5: Boxplot (25% og 75% kvartiler) der beskriver forsinkelsestiderne i grundvandsstanden efter højvandsbegivenhed i havniveau. Med blå er det nordlige profil og grøn det sydlige profil.



Figur 6: For hver højvandsbegivenhed er amplituden plottet mod logaritmen af afstanden til kysten. Den rette linje i figuren repræsenterer dermed en logaritmisk funktion. Hvert punkt angiver amplitudehøjden af en grundvandsstigning ved en logger. De seks loggerpositioner er vist ved deres afstand til kysten på x-aksen. Punkterne er farvekodet efter højden på havniveauøgningen.



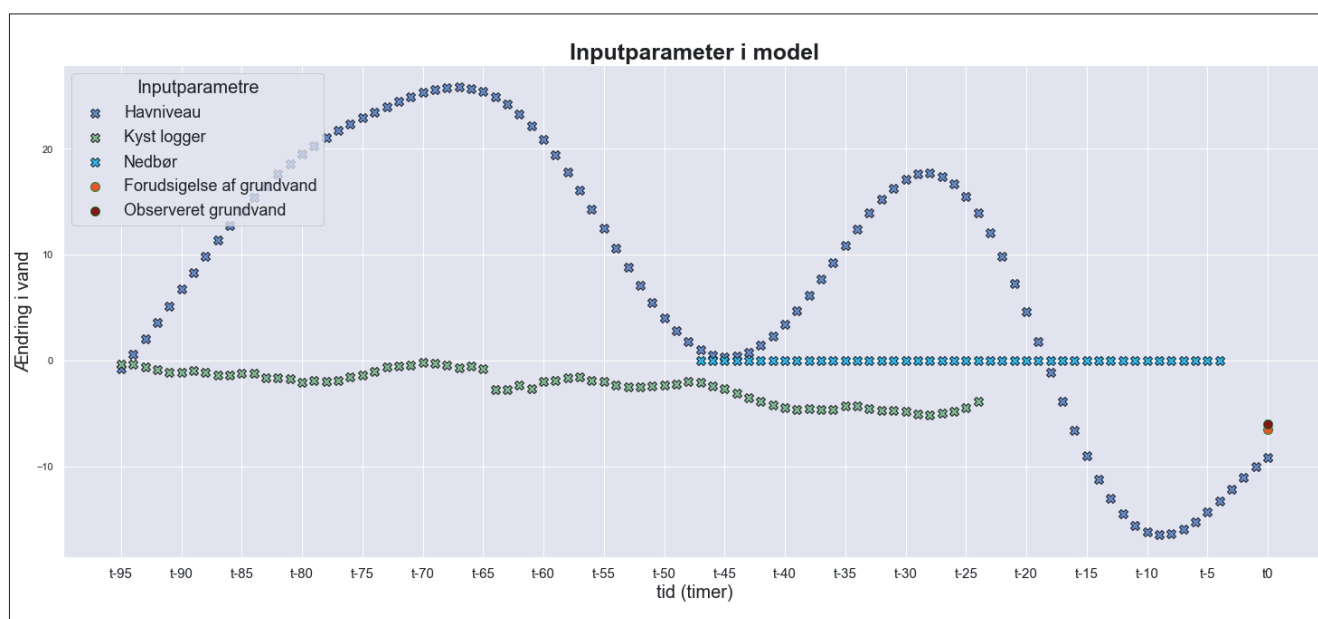
Figur 7: Udsnit af data fra de 6 loggerpositioner. Loggerdata med gult, nedbør med blå. Bemærk at serierne har forskellig y-akse. Dermed kan udsvingsstørrelser ikke sammenlignes. Figuren viser sammenhæng imellem nedbørshændelser og udslag i grundvandsstand, som registreres af loggere ved Juelsminde.

imens den fjerneste logger på det sydlige profil ser ud til at påvirkes af andre faktorer.

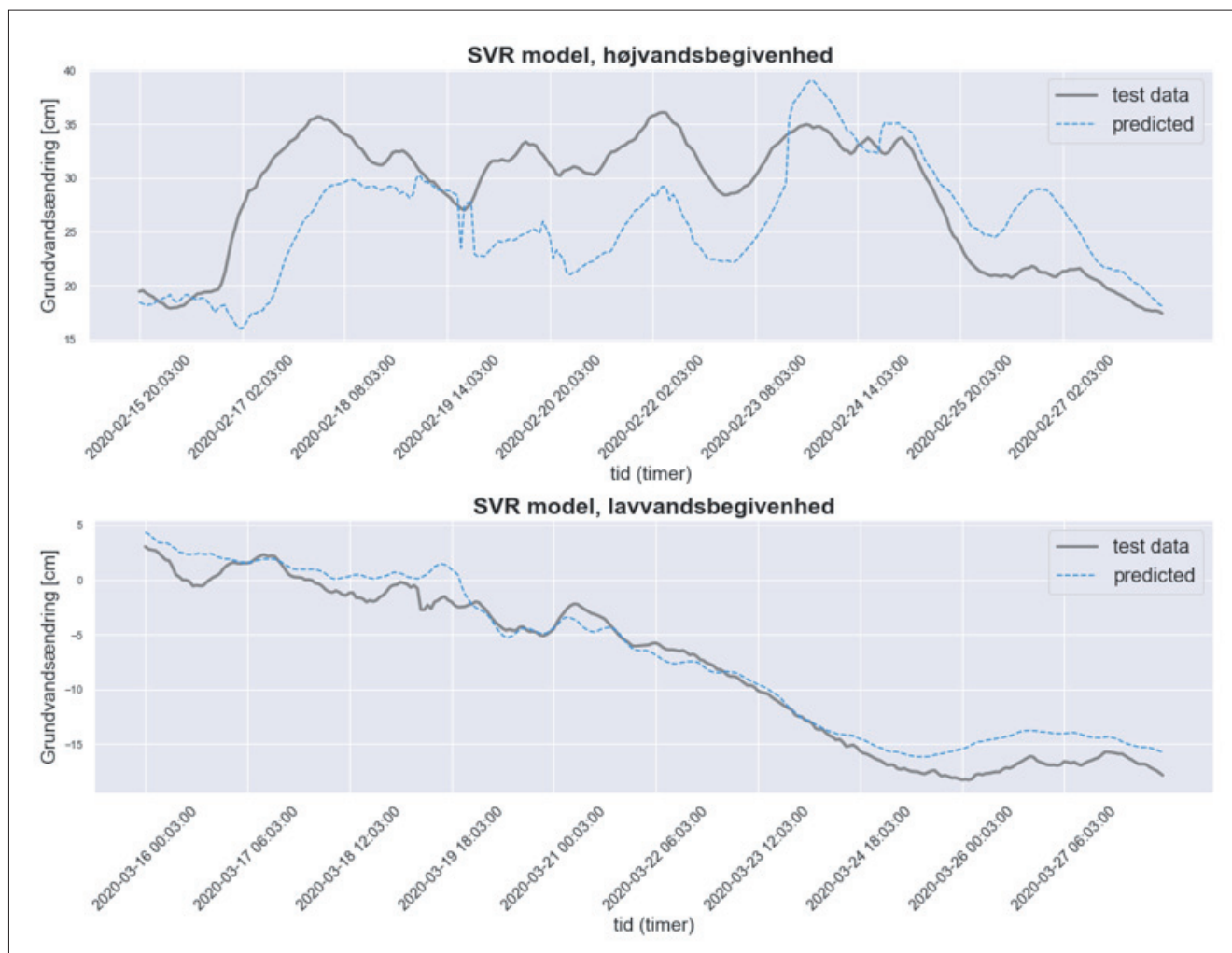
Dæmpningen af grundvandsstigningen er ligeledes undersøgt ved at aflæse højden af de manuelt udvalgte toppunkter i forhold til situ-

ationen inden stigningen. Det fremgår af figur 6, at amplituden på stigningen i grundvandsstanden som følge af havniveaustigningen, falder med øget afstand til kysten. Jf. /6/ forventer vi at dæmpningen af amplituden i et frit

magasin vil have et logaritmisk forløb. Med logaritmisk tidsakse kan sammenhængen således estimeres som en tilpasning med en ret linje, Figur 6. Der er dog outliers, særligt meget store havniveaustigninger giver ekstra



Figur 8: input parametre til SVR-model til beregning af en enkelt forudsagt værdi, inden feature scaling. Mørkeblå: Havniveau. Grøn: Kystlogger. Turkis: Nedbørsniveau. Cirkler: Forudsagt grundvandsniveau (orange), målt værdi (brun).



Figur 9: Grå: Den faktisk målte grundvandsstand ved værdi for logger 6 med grå. Med blå :er Machine learning modellens resultat.

høje amplituder.

Resultaterne af analyserne indikerer at der er sammenhænge, men at kompleksiteten er større end beskrevet ved de to parametre alene hvorfor sammenhængen med nedbør undersøges, figur 7.

Et simpelt dataplot af nedbør imod grundvandsstanden i loggerne viser at der er en sammenhæng. Større nedbørmængder resulterer i en stigning af det terrænnære grundvand. Sammenhængen her er ikke forsøgt beskrevet i detalje, men det tyder på at grundvandsstanden ved logger 2 og logger 5 længst inde i land påvirkes mest af nedbør.

Med mange faktorer som påvirker grundvandet systematisk, men på en ikke enkelt beskrevet analytisk måde er det besluttet at arbejde videre med machine learning modeller.

Machine learning til forudsigelse af grundvandsændringer

Ved test med en ARIMA-model og en SVR (support vector regression)-model gav SVR-modellen de mest præcise resultater, hvorfor den bliver præsenteret her. En SVR-model er en form for regressionsmodel, der skal lave

det bedste fit ud fra de punkter, der ligger indenfor en valgt tilladt usikkerhed/7/. Modellen præsenteret i denne artikel er baseret på en lineær kernel. Med de aktuelle kørsler ønsker vi at undersøge om vi kan forudse grundvandsstand i en enkelt logger 24t frem i tid på baggrund af prognoser for havniveau og nedbør fra DMI samt loggerens aktuelle grundvandsstand.

Input til algoritmen (eksempelvis længden af tidsserier) er valgt på baggrund af de indledende undersøgelser og ved test.

De anvendte inputparametre er data fra kystloggeren, nedbørslogger og havniveauologere, disse er illustreret i figur 8. Havniveau er lavpass-filtreret som beskrevet tidligere. Idet de højvandsituationer som undersøges typisk forløber over flere dage, er der, for at optimere kørselstiden, foretaget en antialiasfiltrering og resamplet til et punkt pr. time. Inden inputdata anvendes til træning, er foretaget en feature scaling, som sikrer, at de forskellige datatyper opnår samme størrelsesorden og dermed vægtes ensartet ved regressionen. I figur 8 er inputdata vist inden feature scaling.

Modellen er trænet på 60% af de tilgængelige data, imens validerings- og krydsvalideringsdata består af hver 20%.

Her vises resultaterne for kystloggeren (logger 7) er placeret 45,5 meter fra kysten.

Resultater for forudsigelser med SVR-model

Figur 9 viser resultaterne for en periode med store havniveau-svingninger og en med små havniveau-svingninger fra valideringsdatasættet. Modellen kan opløse nogen tendenser men skal forbedres for at kunne bruges til varsling. Fremadrettet skal undersøges om forbedring kan opnås med justerede og/andre inputparametre.

Fremtidsudsigter og konklusion

Når havniveauet stiger, kan det registreres i grundvandsloggerne installeret i Juelsminde, i flere tilfælde helt ind til den fjerneste logger som er 210 m fra kysten. Signalet ses, som forventeligt, tydeligst i loggerene nærmest kysten. Der er en forsinkelse på signalet fra højvandsbegivenhederne fra 16 timer 45 m fra kysten til ca. 30 timer 210 m fra

kysten. Det har i flere tilfælde været svært at se højvandsniveauet i loggerne længst inde i landet, hvilket kan skyldes en logaritmisk dæmpning af signalet væk fra kysten. Det medfører, at påvirkningen fra eks. nedbør begynder at have en sammenlignelig amplitude og derfor maskerer signalet fra havet, imens det mere kystnære grundvandsniveau i højere grad domineres af havets påvirkning.

En machine learning-model til forudsigelse af grundvandsstanden i en logger 24t frem i tid baseret på havniveau, nedbørsdata fra DMI, og aktuel loggerdata er testet. Forudsigelserne er lovende, men kræver optimering. Målet er at det kan blive muligt at varsle borgerne, når grundvandet forventes at nærme

sig terræn. For at forbedre algoritmen indsamles data fra yderligere 14 loggere som installeres i området. Dermed skal korrelationsafstanden imellem loggerne også undersøges.

Tak til

Dette projekt har modtaget støtte fra EU life, INSERO og Engell Friis Fonden

Referencer

/1/ Kroon, Aart: Kyster i Hedensted Kommune i Trap Danmark på lex.dk. Hentet 22. oktober 2021 fra https://trap.lex.dk/Kyster_i_Hedensted_Kommune
 /2/ Hedensted Kommune, 2015. Risikostyringsplan 2015 for Juelsminde 28.
 /3/ Eftersyn af Søkjær dige, Juelsminde, Rambøll, 2017

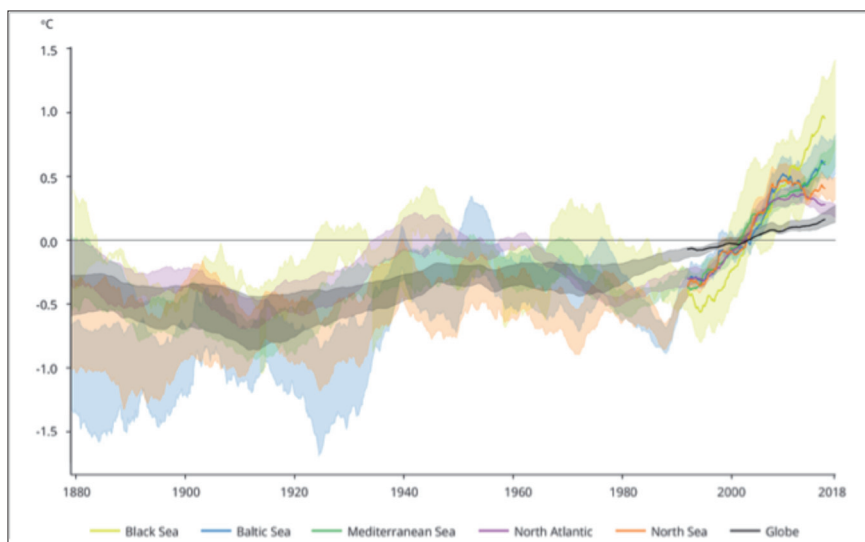
/4/ Revurdering og ajourføring af risikostyringsplan for oversvoemmelse Juelsminde, Januar 2021
 /5/ Mary P. Anderson, William W. Woessner, Randall J. Hunt, 2002. Applied Groundwater Modeling - simulation of flow and advective transport.
 /6/ Schwartz, F.W., Zhang, H., 2003. Fundamentals of groundwater. John Wiley and sons, inc.
 /7/ Aurélien Géron, 2019. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow - Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems, Second edition. ed.

HENRIETTE HØJMARK HANSEN, ANNA BONDO MEDHUS ANBM@VIA.dk, THEIS RAASCHOU ANDERSEN THRA@VIA.dk, SØREN ERBS POULSEN, OG RONJA CEDERGREEN FORCHHAMMER arbejder med klimatilpasning hos VIA University College.

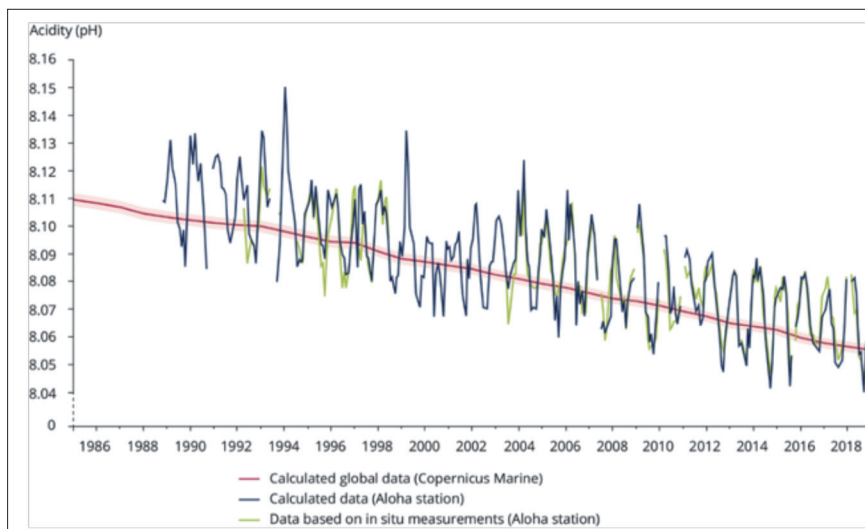


Lidt at tænke over

Figuren viser globale og regionale gennemsnitlige havoverfladetemperatur anomalier forhold til en 1981-2010 baseline. De faste linier viser satellite-baserede analyse data. De skyggede områder i hvert plot indikerer den øvre og nedre usikkerhed på langtidsudviklingen i de regionale gennemsnit baseret på 3 globale datasæt.



Figur 1: Decadal gennemsnitlige havoverfladetemperatur anomalier i forskellige europæiske have (1870 til 2018)



Figur 2: Fald i havets pH målt på Aloha station (Hawaii) og årlige gennemsnitlige pH værdier i overflade havvand rapporteret på globalt plan (Copernicus Marine). Et fald i pH svarer til en stigning i surhedsgraden af havvand.