

Radarkaugseire kasutamine Läänemere lainetuse ja tuuleväljade määramiseks

Rikka, S.¹, Uiboupin, R.¹, Pleskachevsky, A.², Alari, V.¹,
Jacobsen, S.², Kõuts, T.¹

¹Tallinna Tehnikaülikool, Meresüsteemide instituut, Akadeemia tee 15a, 12618, Tallinn

² German Aerospace Center (DLR), Remote Sensing Technology Institute, 28199,
Bremen, Germany

Email: sander.rikka@taltech.ee

Eesmärk

- **Arendada/parandada, valideerida ja demonstreerida radarkaugseire väärtust Läänemere lainetuse ja tuuleväljade määramisel**
 - Hinnata olemasolevate *state-of-the-art* meetodite täpsust
 - Kõrglahutuslike TerraSAR-X/TanDEM-X StripMap andmed
 - Sentinel-1A/B IW andmed
 - Kaldaradari andmed
 - Valideerida olulise lainekõrguse määramise algoritme Läänemere oludes
 - XWAVE_C
 - Pleskachevsky et al. 2016, *ISPRS*, 119; Rikka et al. 2018, *IJRS*, 39(4)
 - CWAVE_S1-IW
 - Pleskachevsky et al. (*submitted to IJRS*); Rikka et al. 2018, *Remote Sensing*, 10(5)
 - Kaldaradarile arendatud meetod
 - Rikka et al. (*submitted to IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*)
 - Valideerida tuule määramise algoritmide tulemused (XMOD-2 and CMOD)
 - Rikka et al. 2018, *IJRS*, 39(4); Rikka et al. 2018, *Remote Sensing*, 10(5)
- Võrrelda erinevate radarandmete (TS-X, Sentinel-1, kaldaradar) lainekõrguse tulemusi (operatiivse) lainemudeli tulemustega
- Uurida radarandmete kasutamise lisandväärtust merega seotud teadlikkuse tõstmisel Läänemeres

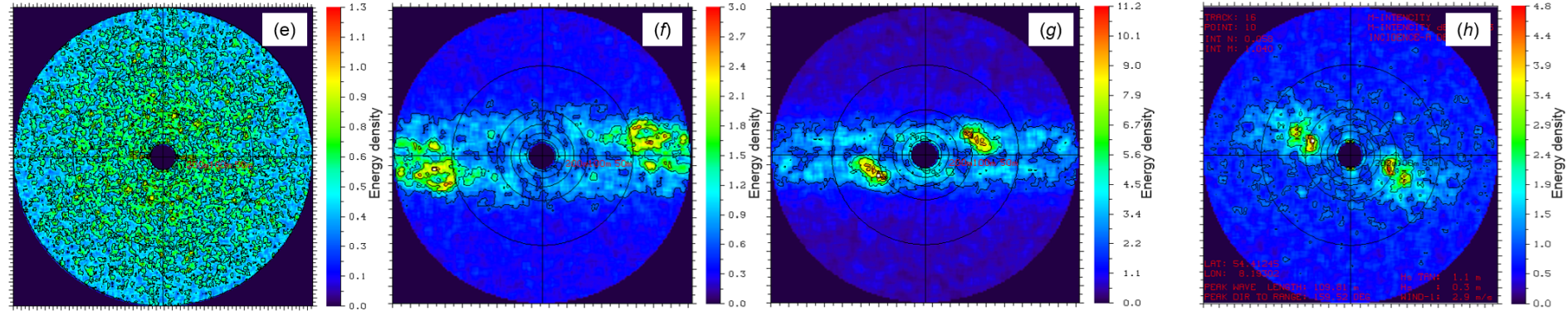
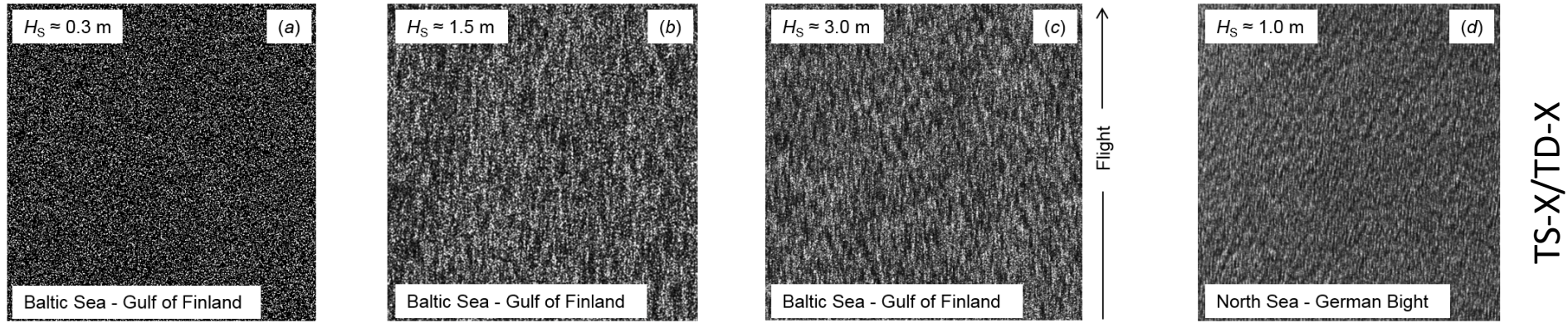
Laine- ja tuuleolud Läänemeres

- Tuhanded saared jm madalad alad
- Dominantne tuulesuund
 - $180^\circ - 315^\circ$ (S – NW)
 - Sageli täheldatud tuule ja laine suuna erinevus kuni 50°
- Dominantne laine periood
 - 2 – 8 s
 - Väike ummiklainetuse komponent H_S
- Dominantne lainekõrgus
 - H_S vahemikus 0–3 m
 - Kuni 10 m
 - Oleneb regioonist/lahest
 - Selge aastane tsükkel
- Lühike laine „mälu“
- **Vaevu äratuntav lainemuster SAR pildil**
- **Mürased pildid**



Leppäranta and Myrberg, 2009

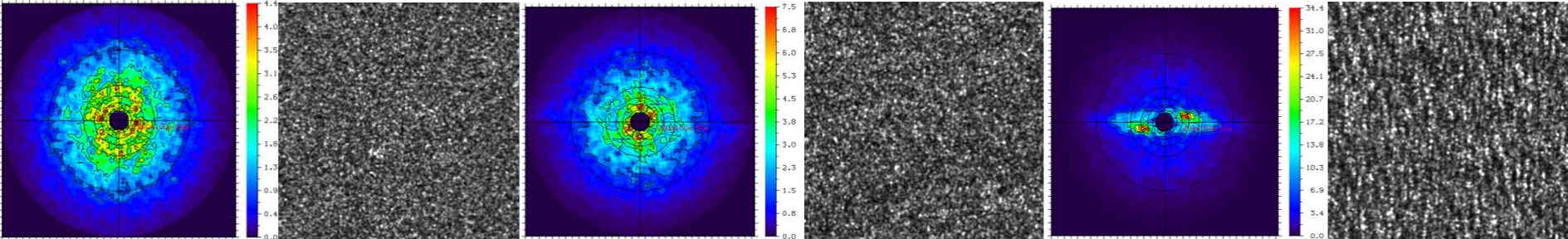
SAR pildistamise näited Läänemeres



2015.07.05 04:59 UTC – H_s 0.5 m

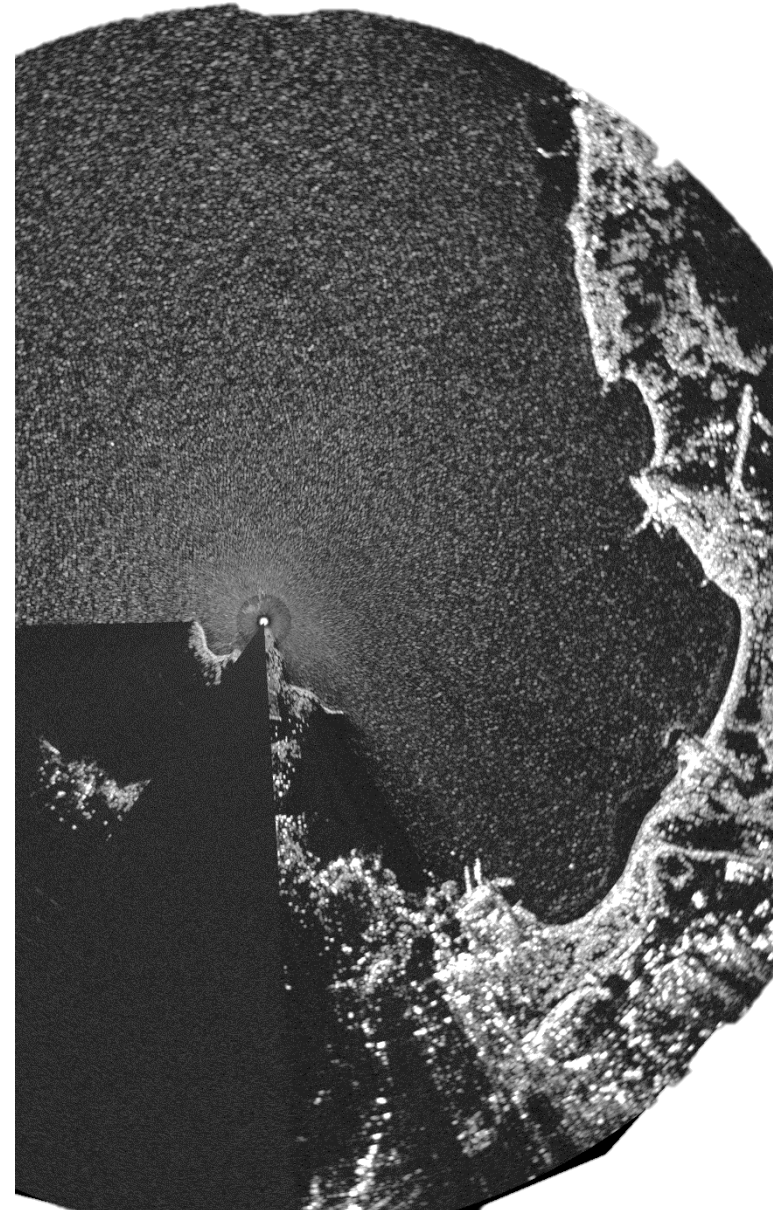
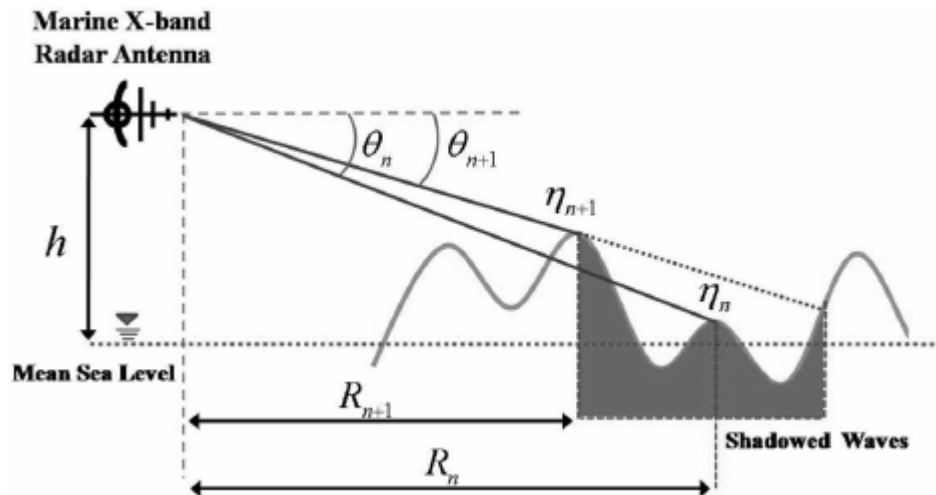
2015.10.01 16:22 UTC – H_s 2.7 m

2015.01.11 16:19 UTC – H_s 3.9 m



Kaldaradari andmetele iseloomulikud omadused

- Täiendavad efektid, mis mõjutavad pilte
 - Väga suur kiire langemisnurk
 - **Lainete varjutamine**
 - Täiendavad peegeldused väikestelt protsessidelt, nt *whitecapping*



Andmed – *in situ* mõõtmised, radar, lainemudel

Dev. – algoritmi arendamine; Val. – valideerimine; Comp. – võrdlemine *in situ* või lainemudeli andmetega; Stat. – hooajaline või piirkondlik statistika

Sensor	Radari lainepikkus	Piksli suurus	Ajaline res.	Ruumiline katvus	Periood	Piltide arv	Eesmärk	<i>In situ</i> kollokatsioonid	Lainemudeli kollokatsioonid
TS-X TD-X	X-band 3.1 cm	3×3 m	On demand	30× kuni 250 km	2012- 2017	92	Dev. Val. Comp.	117 H_S 102 U_{10} 44 L_P , γ_P	55 L_P , γ_P SWAN
Sentine I-1 IW	C-band 5.5 cm	10×10 m	1 – 2 päeva	250× kuni 10^3 km	2015- 2016	15 460	Val. Comp. Stat.	52 H_S 358 U_{10} 101 H_S	49314 H_S WAM 201 H_S
Marine radar	X-band 3.2 cm	5×5 m	1 h	Umbes 10 km radari- tornist	18.10. - 14.11.16	559	Dev. Val.	1678 H_S 1464 H_S	- -

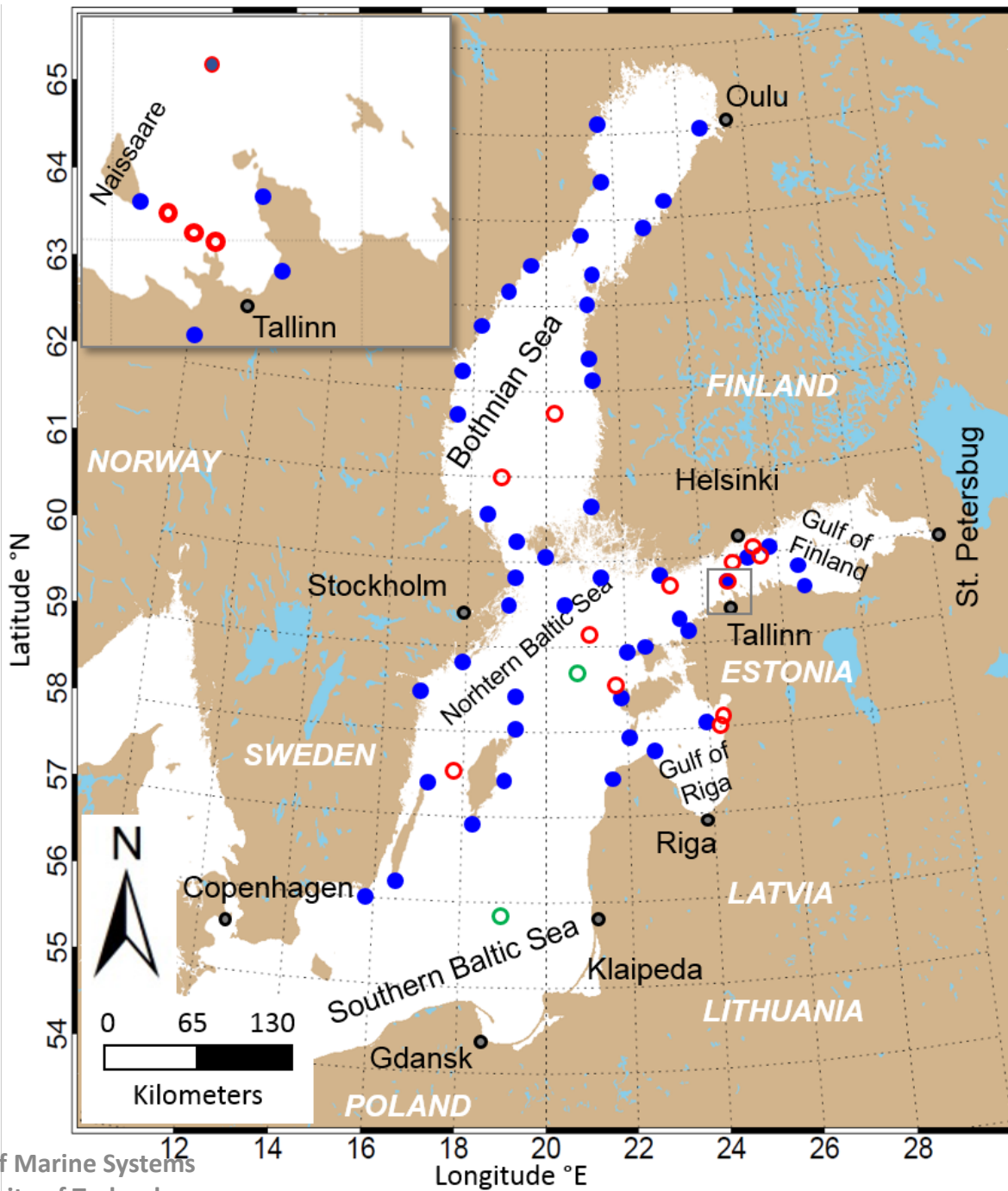
H_S kogu oluline lainekõrgus

U_{10} tuule kiirus

L_P piigi lainepikkus

γ_P piigi laine levimise suund

Andmed – *in situ* mõõtmised, radar,
lainemudel



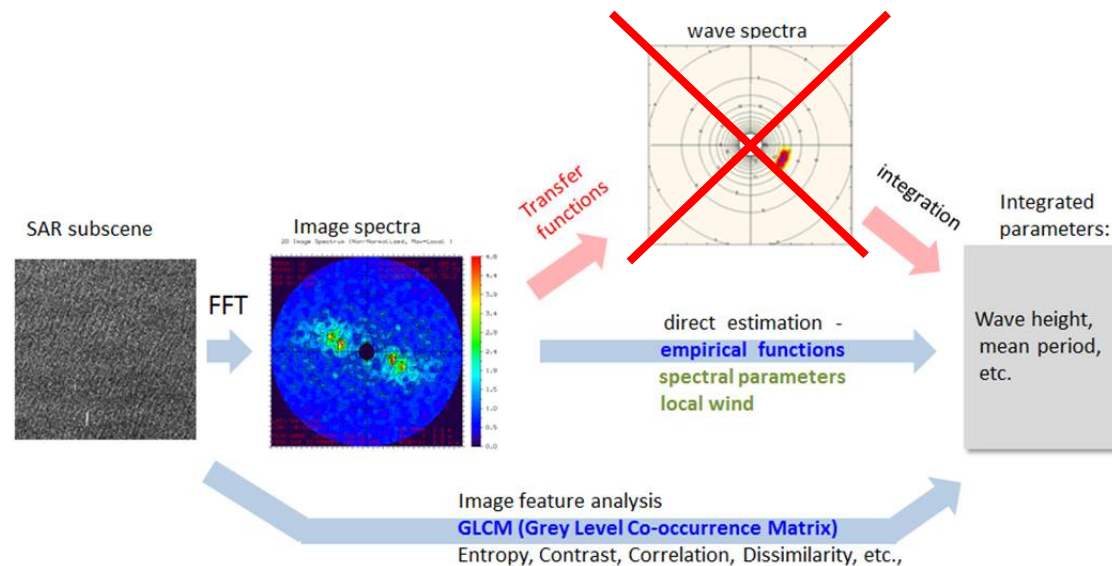
SAR meetodid: tuul

- Lainetus on tugevalt seotud lokaalse tuule parameetritest
- XMOD-2 and CMOD
- $\sigma_0(U, \theta, \phi) = B_0^p(U_{10}, \theta)(1 + B_1(U_{10}, \theta) \cos(\phi) + B_2(U_{10}, \theta) \cos(2\phi))$
 - σ_0 – Normalized Radar Cross Section (NRCS)
 - U_{10} – tuule kiirus
 - ϕ – tuule suuna sõltuvus SAR lennusunda
 - θ – lokaalne kiire langemisnurk
 - B_i - koefitsiendid XMOD-2 and CMOD jaoks eraldi
- Koos polarisatsiooniseosega XMOD-2 jaoks (Li and Lehner, 2014):
 - $PR = \frac{\sigma_0^{VV}}{\sigma_0^{HH}} = X_0 EXP(X_1 \theta)$, kus X_0 ja X_1 on koefitsiendid
- Vastavalt Monaldo et al. 2016, kasutatakse erinevaid GMFs tuule kiiruse leidmiseks
 - CMOD4 koos Thompson, D. R., et al. (1998) PR'iga HH polarisatsioonis ja CMOD5.N VV polarisatsioonis andmete jaoks
- Tuule suund Weather Research and Forecasting Model (WRF) (Skamarock et al. 2005)
- WRF tuule suund interpoleeritakse vastavalt SAR andmetöötamise arvutusvõrgule

Radar meetodid: oluline lainekõrgus

- NRCS arvutamine piksli digitaalsest numbrist
- Artefaktide filtreerimine
- Alampildi normaliseerimine
$$\sigma_n(x, y) = \frac{\sigma_0(x, y) - \langle \sigma_0 \rangle}{\langle \sigma_0 \rangle}$$
- Kiire Fourier teisendus (FFT)
- Empiiriline funktsioon ilma lainespektrisse transformeerimata
- Lisaks pildi halltasemete matriksi (GLCM) statistikud
- Meetod põhineb suurel hulgal andmete võrdlemisel ja valideerimise vabalt kättesaadavate in situ andmetega

Sea state parameter estimation



Quality Control: Buoys (location) and Wave model results (spatial distribution)

- XWAVE_C - Pleskachevsky et al. 2016, *ISPRS*, 119
- CWAVE_S1-IW - Pleskachevsky et al. (*submitted to IJRS*)

Radari meetodid: oluline lainekõrgus

- Pildispektri energia FFT operatsioonist

- $E_{IS} = \int_{k_x^{min}}^{k_x^{max}} \int_{k_y^{min}}^{k_y^{max}} IS(k_x, k_y) dk_x dk_y$

- $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ kus k_{max} ja k_{min} oleneb konkreetsest radarandmest

- Oluline lainekõrgus

- $H_S = a_0 \sqrt{B_0 E_{IS} \tan(\theta)} + \sum_{i=1}^n a_i B_i$

- θ lokaalne kiire langemisnurk

- a_i on koefitsiendid ja B_i on funktsioonid spektraalsete parameetrite, tuule ja GLCM andmete jaoks vastavalt radarile

- Empiiriline algoritm kaldaradari andmetele

- H_S hindamine põhineb pildispektri energial E_{IS}

- Arvutatud parameetrid võrreldakse *in situ* väärtustega

- Parima sobiva trendijoone tehnika

- Pearsoni korrelatsiooni koefitsient

- RMSE minimiseerimine

- $B_0 = f(d, \theta)$

- $B_1 = f(d, \theta, \bar{x})$, kus $\bar{x} = \sum_{i=0}^{2G-2} i P_{x+y}(i)$

- $B_2 = f(d, \theta, \sigma^2)$, kus $\sigma^2 = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} (i - \mu)^2 P(i, j)$

- d – kaugus radarist

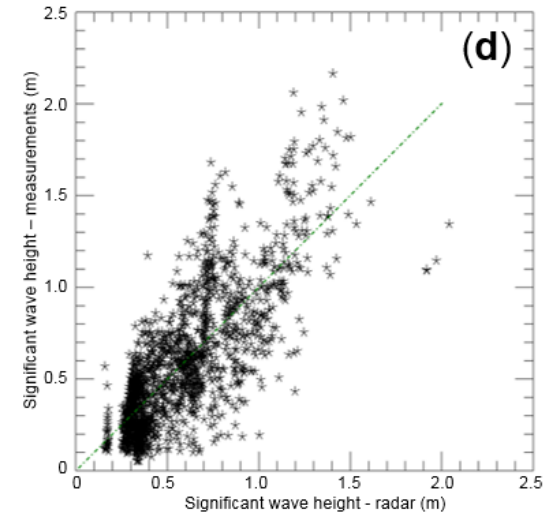
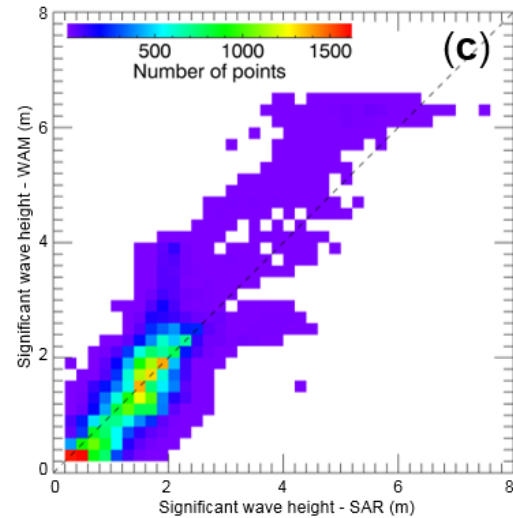
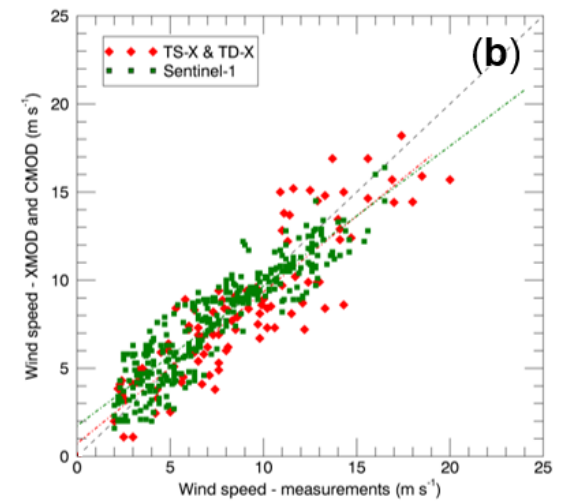
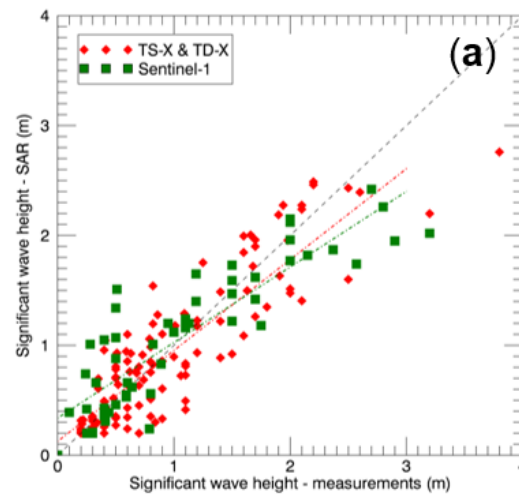
- \bar{x} – GLCM keskmine

- σ^2 – GLCM dispersioon

- P – kollokatsioonide arv GLCM tasemete G vahel

Tulemused: valideerimine

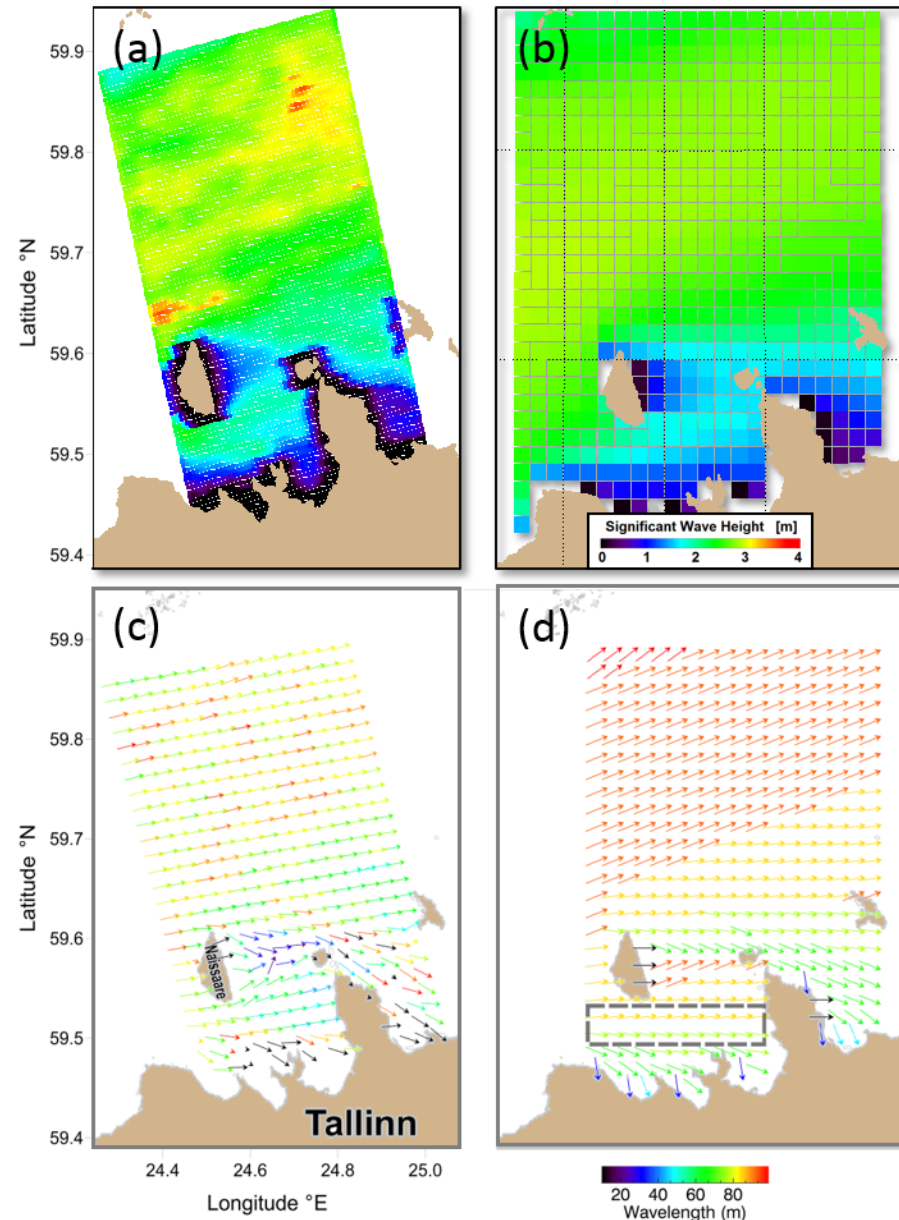
- Radarilt määratud tuule kiirus vastavuses *in situ* mõõtmistega, eriti Sentinel-1 jaoks, kus RMSE on vähem kui 1.5 m s^{-1}
- Radarilt määratud H_S täpne, r pisut väiksem kui 0.90, RMSE väiksem kui 0.5 m
- Hea vastavus 0 – 3 m lainekõrguse vahemikus (tüüpiline Läänemeres) SAR ja WAM mudeli vahel



Kollokatsiooni-paar	TS-X TD-X vs. <i>in situ</i>	TS-X TD-X vs. <i>in situ</i>	Sentinel-1 vs. <i>in situ</i>	Sentinel-1 vs. <i>in situ</i>	Sentinel-1 vs. WAM	Marine radar vs. <i>in situ</i>
Parameeter	H_S	U_{10}	H_S	U_{10}	H_S	H_S
r	0.88	0.90	0.88	0.91	0.86	0.78
RMSE	0.32	2.02	0.40	1.43	0.47	0.23
SI	0.33	0.24	0.37	0.19	0.33	0.41
n	117	102	52	357	49314	1678

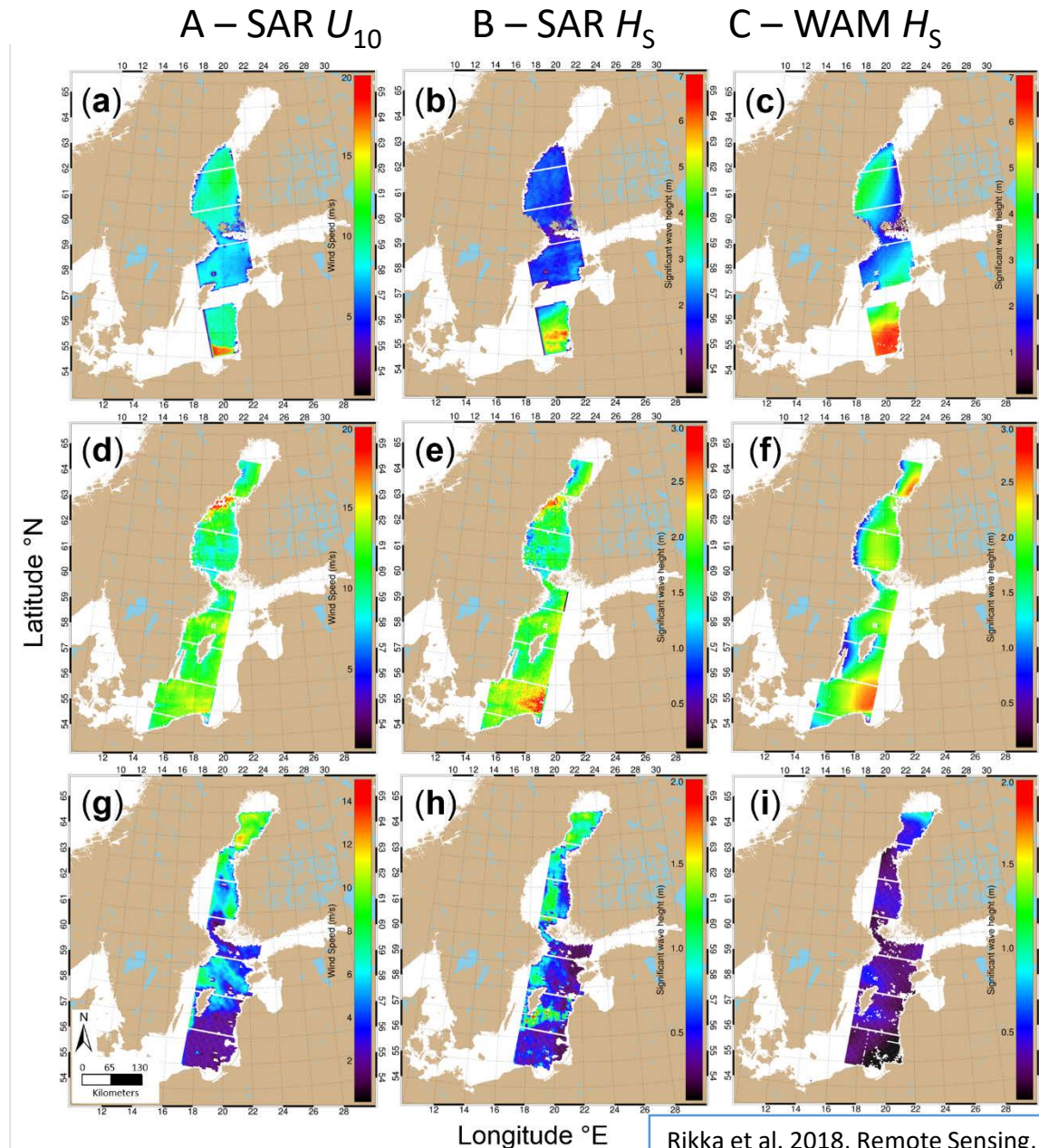
Lainevälja lokaalne muutlikkus kõrglahutusliku SAR andmete põhjal

- Üldine vastavus SWAN lainemudeli tulemuste ja SAR pildilt arvutatud olulise lainekõrguse väärtuste vahel
- Üleüldine olulise lainekõrguse, lainepikkuse ja laine levimise suuna muutlikkus suurem SAR andmete põhjal



Sentinel-1 andmed regionaalseteks uuringuteks

- Lainekõrgus kuni 7.5 m
- Üldine vastavus lainekõrguse väärtuste ja maksimaalsete väärtuste asukoha vahel
- Tormi piigi piirkond väiksem SAR andmetel kui WAM
- Tormi mõju ei ulatu nii põhja kui WAM tulemuste kohaselt
- Maksimaalne H_S kõrgem SAR andmetelt
- Lainevälja muutlikkus (STD) palju suurem SAR andmetest
- Muutlikkus seotud lainemudeli tuule sisendiga, mis ei sisalda lokaalseid tuule variatsioone, puhanguid, fronte jms.



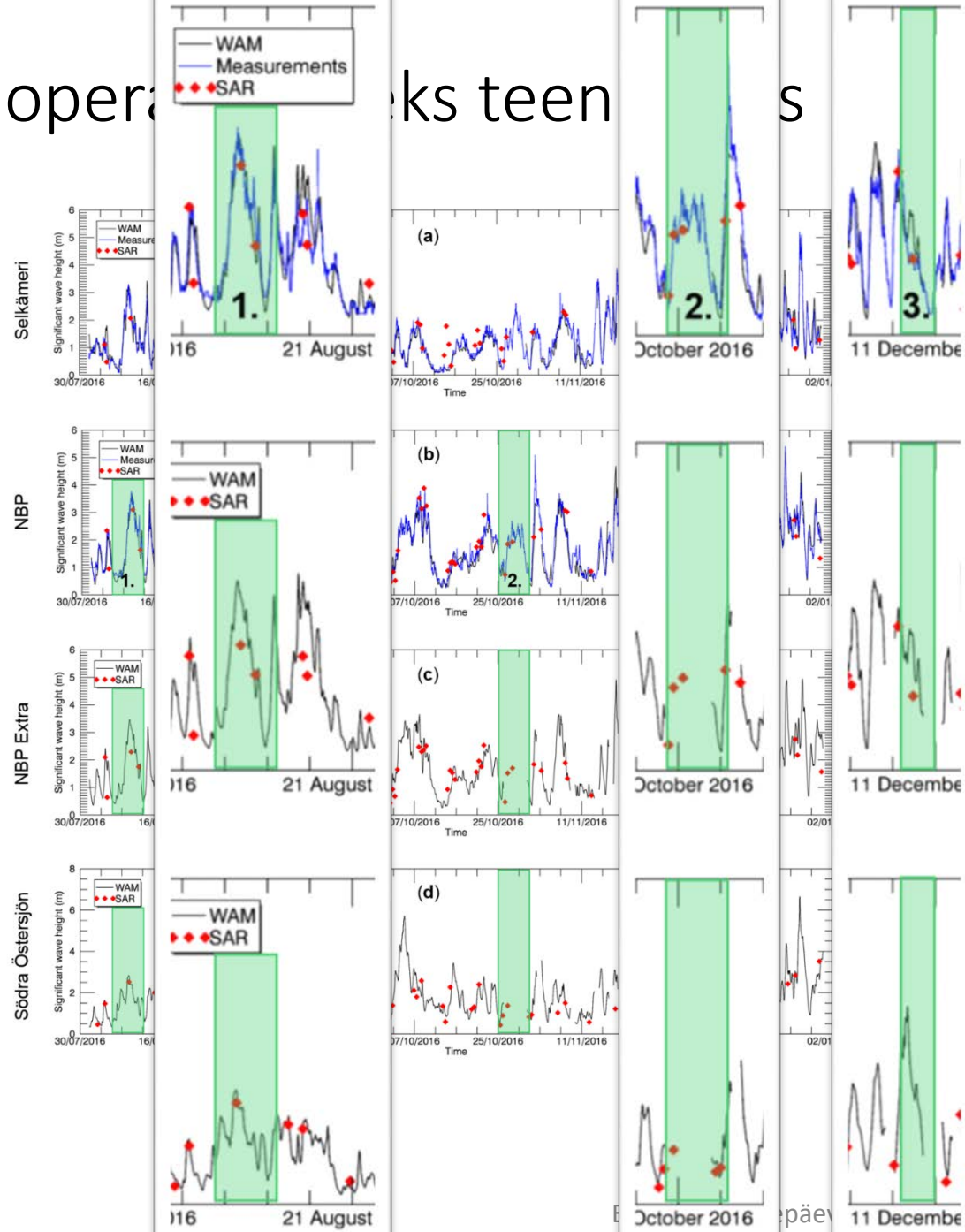
2015.01.11 16:20 UTC
Kõrged laineolud

2015.10.02 05:00 UTC
Keskmised laineolud

2015.07.05 05:00 UTC
Madalad laineolud

Sentinel-1 andmed operatsiooni jaoks teen

- Andmerida 1. August 2016 kuni 2016 lõpuni
- Case 1 – erinevus olulise lainekõrguse väärtustes WAM ja SAR vahel
 - SAR andmetest suurem H_S ruumiline muutlikkus
- Case 3 – sarnane Case 1, aga laineväli ühtlasem
- Case 2 – puudulikud *in situ* või lainemudeli tulemused saab asendada SAR mõõtmistega
 - Tehnilised probleemid
 - Mõõteseadete hooldustööd
- BOOS mõõtejaam Södra Östersjön – puudulikud *in situ* mõõtmised alates 2011, ehkki pidevalt esinev kõrge lainetus

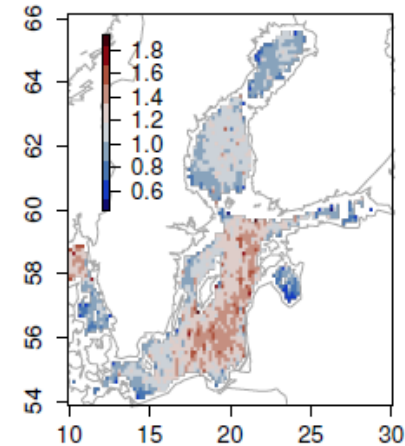
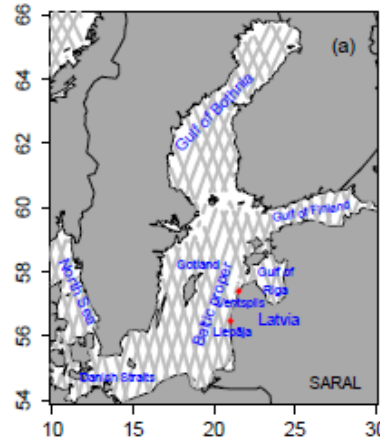


Statistilised laine- ja tuuleväljade kaardid

Näiteks Kudryavtseva and Soomere (2017) analüüsisid altimeetria andmeid Läänemere lainevälja jaoks

- Andmed vahemikus 1993-2015
- Väljundvälja resolutsioon $0.2 \times 0.1^\circ$

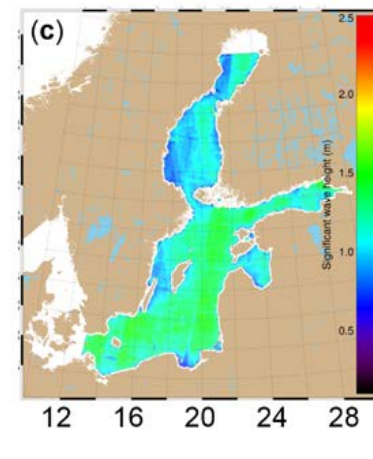
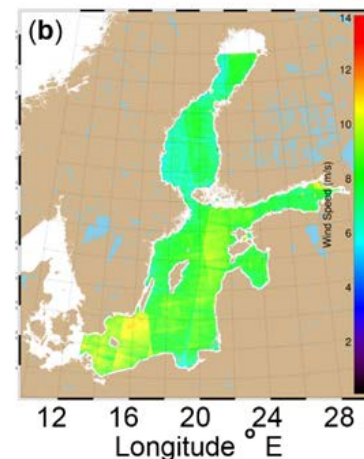
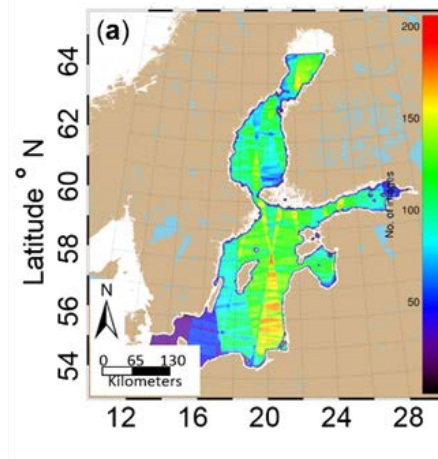
- Sarnane tulemus SAR andmete põhjal
- Andmed 2015-2016
- Väljundvälja resolutsioon 3 meremiili



Piltide arv

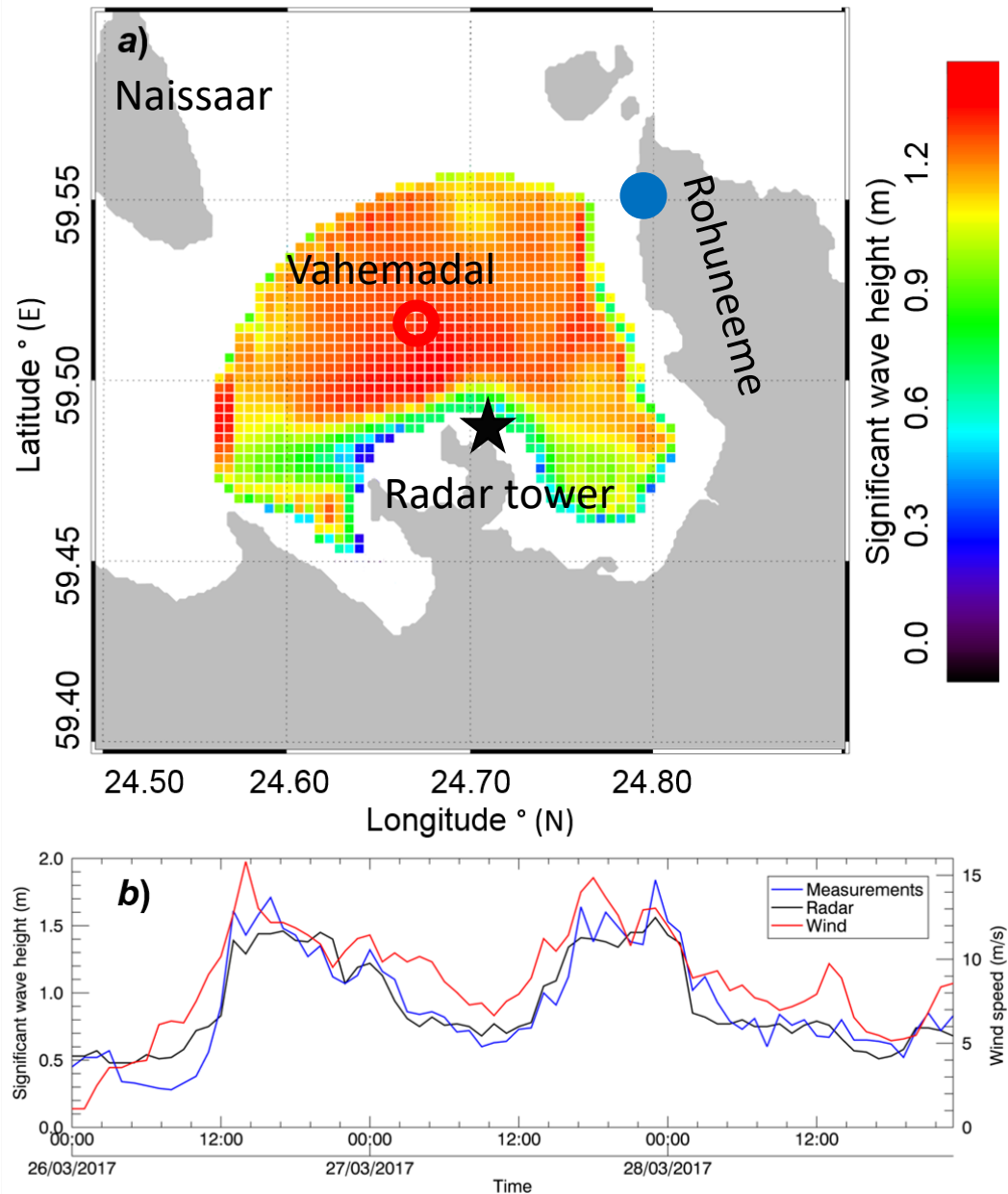
Keskmine U_{10}

Keskmine H_S



Kaldaradari andmed operatiivseks teenuseks

- Keskmise H_s väli 26.03 – 28.03.2017 NW tormi jaoks
- *in situ* mõõtmiste ja radarilt tuletatud H_s vahel hea vastavus tormi perioodil
- Sarnane H_s laineväli tuletatud ka teiste autorite poolt võrreldavates oludes
- Laine levimine Tallinna lahte Naissaare ja mandri vahelt
- Maksimaalne H_s Paljassaare poolsaare tipu ümbruses
 - Sügavus umbes 30 m



Kokkuvõte

- Olulise lainekõrguse ja tuule kiiruse määramise meetodid erinevate radarandmete jaoks valideeriti Läänemere tingimustes
 - XWAVE_C H_S jaoks ($r = 0.88$, RMSE = 0.32 m)
 - CWAVE_S1-IW H_S jaoks ($r = 0.88$, RMSE = 0.40 m)
 - Kaldaradar H_S jaoks ($r = 0.78$, RMSE = 0.23 m)
 - XMOD-2 U_{10} jaoks ($r = 0.90$, RMSE = 2.02 m s⁻¹)
 - CMOD U_{10} jaoks ($r = 0.91$, RMSE = 1.43 m s⁻¹)
- Statistikud näitavad, et radarandmetelt määratud geofüüsikaliste parameetrite täpsus on piisav, et neid kasutada rutiinsel monitoorimisel
- Võrreldes lainemudeli tulemustega annavad SAR andmetest määratud lainekõrguse tulemused rohkem informatsiooni ruumilise muutlikkuse kohta
- SAR andmetest määratud tuule kiirust võiks kasutada lainemudeli tuuleväljaks

Kokkuvõte

- SAR andmetest määratud olulist lainekõrgust ja tuule kiirust saab kasutada *in situ* mõõtmiste või lainemudeli tulemuste asemel piirkondades, kus ja ajal, mil need puuduvad
- SAR andmed võimaldavad detailsemalt jälgida ranniku-lähedase lainevälja variatsioone võrreldes teiste EO sensoritega (nt altimeetria)
- SAR andmed võimaldavad läbi viia regionaalseid ja/või hooajalisi lainekliima uuringuid
- Paljassaare kaldaradari andmed demonstreerivad, et lainevälja saab täpselt jälgida nii ruumis kui ajas
- Arvestades kõike eelnevat, oleksid radariandmetel põhinevad tuule- ja laineandmed kasulikud üldise merealase teadlikkuse tõstmise rakendustes ja rutiinse seire ning prognoosi jaoks Läänemeres

Tänu tähelepanu eest!

