

**DANMARKS METEOROLOGISKE  
INSTITUT**

**— TEKNISK RAPPORT —**

**03-23**

**DMI's operationelle bølgemodel  
Version 4**

**Jacob Woge Nielsen**



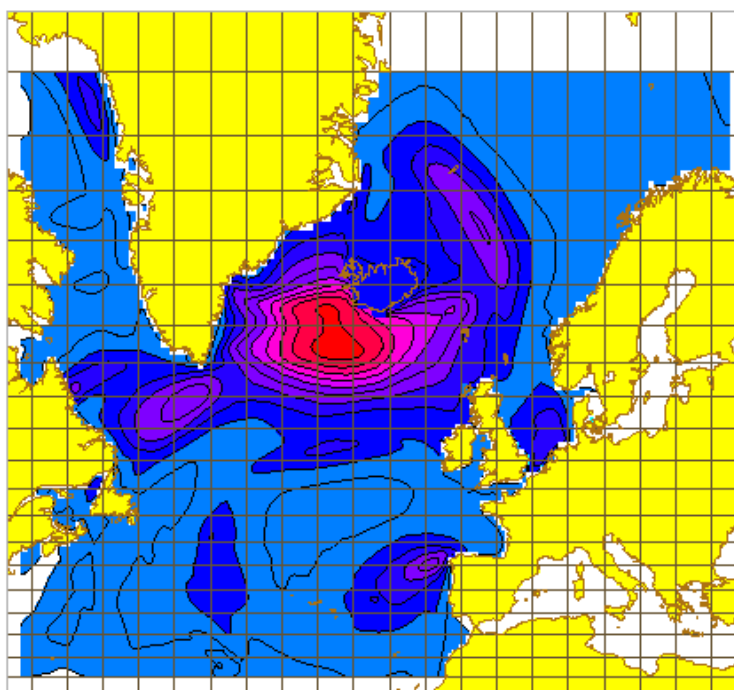
**København 2003**

**ISSN 0906-897X (trykt)**  
**ISSN 1399-1388 (online)**

# **DMI's operationelle bølgemodel Version 4**

**Jacob Woge Nielsen  
DMI/VO**

**26. maj 2003**



# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>WAM Cycle4</b>	<b>4</b>
2.1	Bølgeenergiligningen . . . . .	4
2.2	Diskretisering . . . . .	4
2.3	Tidslig integration . . . . .	5
2.4	Rand- og initialbetingelser . . . . .	5
2.5	Nesting . . . . .	5
2.6	Bølgeparametre . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Modelopsætning</b>	<b>7</b>
3.1	Beregningsnet . . . . .	7
3.2	Bathymetri . . . . .	8
3.3	Datablokke . . . . .	9
3.4	Atmosfærisk forcering . . . . .	9
3.5	Refraktion . . . . .	9
3.6	Havis . . . . .	9
3.7	Spektral diskretisering . . . . .	9
3.8	Tidsskridt . . . . .	10
3.9	Koldstart og initialisering . . . . .	10
3.10	Åbne rande . . . . .	10
3.11	Output . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Afvikling</b>	<b>12</b>
	<b>Referencer</b>	<b>14</b>

# 1 Indledning

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) kører en operationel bølgemodel kaldet *DMI-WAM* (DMI WAve Model). Modelkørslerne leverer bølgeprognoser i høj tidslig og rumlig opløsning til DMI's rutevejledning og til eksterne kunder. Bølgeprognoser for det danske nærrområde offentliggøres på Internettet.

Kernen i systemet er *WAM Cycle4*, en 3. generations spektral bølgemodel udviklet af SWAMP (Sea Wave Modelling Project) arbejdsgruppen i sidste halvdel af 1980'erne [3],[4]. *WAM Cycle4* beregner den spektrale vindskabte bølgeenergi og udleder heraf en række bølgeparametre som signifikant bølgehøjde, parametre for sø og dønning m.v. Modellen er public domain software, og anvendes til forudsigelse af bølger ved en lang række institutioner over hele verden, herunder European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF).

DMI-WAM blev startet medio 1999 og har været kørt siden under stadig udvidelse og forbedring. Version 4 dækker Atlanterhavet nord for 30°N, med speciel fokus på Nordsøen, Østersøen og farvandene omkring Danmark. En separat model er sat op for Middelhavet. Modellens input er prognoser for 10 meter vind, beregnet med DMI's numeriske vejrmodeller Hirlam-E og Hirlam-G.

DMI-WAM bliver afviklet 4 gange dagligt på DMI's supercomputer NEC/SX6.

## 2 WAM Cycle4

WAM Cycle4 er en 3. generations spektral bølgemodel, som løser den spektrale bølgeenergiligning eksplicit uden antagelser om spektrets form. Resultatet er information om havoverfladens middeltilstand som funktion af sted og tid. Modellen regner på et prædefineret topografisk datasæt (bathymetri), givet i sfæriske eller Cartesiske koordinater. Dybde- og strømrefraktion kan til- eller fravælges, men havstrømmen skal være stationær i tid. Tidsafhængigt input til modellen er vindenergi, der tages fra en numerisk vejrmødel. WAM Cycle4 er udførligt beskrevet i [4].

### 2.1 Bølgeenergiligningen

Den spektrale bølgeenergiligning er:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{c}_g \cdot \vec{\nabla} F = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + S_{bf} + S_{cu}$$

hvor  $F(f, \theta; \vec{x}, t)$  = spektral bølgeenergitæthed, afhængig af bølgens frekvens  $f$  og retning  $\theta$  samt sted og tid;  $c_g(f, d)$  = dybdeafhængig gruppehastighed (energiens forplantningshastighed);  $S_{in}$  = input af energi fra vinden;  $S_{ds}$  = dissipation af energi ved brydning af bølger;  $S_{nl}$  = ikke-lineær bølge-bølge-vekselvirkning;  $S_{bf}$  = vekselvirkning med havbunden ved friktion og refraktion;  $S_{cu}$  = vekselvirkning mellem bølger og permanent havstrøm.

Hvert af kildeleddene er parameteriseret; det udgør modellens 'kerne'. Produktion  $S_{in} = \gamma F$  og dissipation  $S_{ds} = -\gamma_d F$  af bølgeenergi er proportional med den spektrale bølgeenergi. Produktionsfaktoren  $\gamma$  afhænger af vinden og af bølgefeltet. Dissipationsfaktoren  $-\gamma_d$  afhænger af bølgetallet, således at korte bølger dissiperer mest. Ikke-lineær bølge-bølge vekselvirkning  $S_{nl}$  bliver udregnet eksplicit, og er dermed bestemmende for spektrets form. Dette er en videreudvikling fra 2. generationsmodeller, hvor spektrets form blev foreskrevet. Se i øvrigt [4].

### 2.2 Diskretisering

Modellen regner på et regulært net, som enten kan være sfærisk eller Cartesisk. Meget store beregningsnet deles op i blokke, som vekselvirker via filer skrevet til disk.

Den spektrale diskretisering vælges ved at angive antallet af retninger og frekvenser, samt modellens mindstefrekvens  $f_0$ .

## 2.3 Tidslig integration

Advektionsleddet integreres med et første ordens opstrøms skema. Kildeleddene integreres med et implicit skema. Tidsskridtet  $\Delta t$  skal overholde et CFL-kriterium, som afhænger af den mindste gitterafstand  $\Delta s_{min}$  og den mindste frekvens

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta s_{min}} \frac{g}{4\pi f_0} < 1$$

Overholdelse af dette krav er ikke altid nok til at sikre numerisk stabilitet.

## 2.4 Rand- og initialbetingelser

Åbne modelrande og initialtilstanden parametriseres begge med JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) spektret [2], som antager fuldt udviklet sø i forhold til den lokale vind. JONSWAP spektret er identisk med det peak-forstærkede Pierson-Moskowitz spektrum

$$S(f) = \alpha g^2 \pi^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4}(\frac{f}{f_p})^{-4}} \gamma_J(f, f_p)$$

hvor  $\alpha$  afhænger af det lokale fetch,  $f_p$  beregnes som en funktion af den lokale vind, og  $\gamma_J$  er forstærkningsfunktionen. Spektrets retningsfordeling fås ved at multiplicere med en  $\cos^2$ -fordeling omkring vindretningen. Den spektrale energi har et maksimum ved frekvensen  $f_p$  i vindens retning, og indeholder ingen sekundære maksima (dønning).

## 2.5 Nesting

WAM Cycle4 anvender 1-vejs nesting, så en storskala model kan levere randbetingelser til en model for et mindre havområde i høj opløsning. Modellerne afvikles sekventielt. Storskala modellen skriver en række randfiler, som indeholder de fulde spektre langs den lille models ydre rande. Et specielt rand-modul interpolerer randspektrene fra det grovmaskede til det fintmaskede net, og herefter køres den fintmaskede model. Successiv nesting er mulig (dvs. flere modeller inde i hinanden), men hver model kan kun have 1 underområde. Gitterafstandene skal være hele multipla, så hjørnepunkterne i den fine model falder sammen med gitterpunkter i den grovmaskede model.

## 2.6 Bølgeparametre

Output fra WAM Cycle4 er integrerede bølgeparametre, som beregnes ved hjælp af spektrets momenter

$$m_n = \iint F f^n df d\theta ; m_g = \iint F g(\theta) df d\theta$$

Signifikant bølgehøjde, middelbølgeperiode og middelbølgeretning beregnes som henholdsvis

$$H_s = 4\sqrt{m_0} ; T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} ; \theta_s = \tan^{-1} \frac{m_{sin}}{m_{cos}}$$

Modellen separerer dønning fra vindskabt sø ved kun at integrere den del af spektret som opfylder kriteriet

$$28 \frac{U_*}{C_p} \cos(\phi - \theta) < \frac{5}{6}$$

hvor  $C_p$  er fasehastigheden,  $U_*$  friktionshastigheden og  $\phi$  vindretningen. Bølger der har en høj fasehastighed i forhold til vindhastigheden, eller ikke bevæger sig i vindens retning, er dønning. Når vinden pludseligt ændres, eller dønningen propagerer ind i et område med et andet vindfelt, kan dønning blive genfortolket som sø ifølge kriteriet ovenfor.

Modellen beregner en overfladeruhed  $z_0$  ved

$$z_0 = \frac{\alpha U_*^2}{g \sqrt{1 - \frac{\tau_w}{U_*^2}}}$$

Til forskel fra sædvanlig parametrisering af ruhed i vejrmødeller  $z_0 = \beta U_*^2 / g$ , afhænger  $z_0$  af det bølgeinducerede stress  $\tau_w$ . Charnock parameteren  $\beta$  er givet ved

$$\beta = \frac{gz_0}{U_*^2} = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - \frac{\tau_w}{U_*^2}}}$$

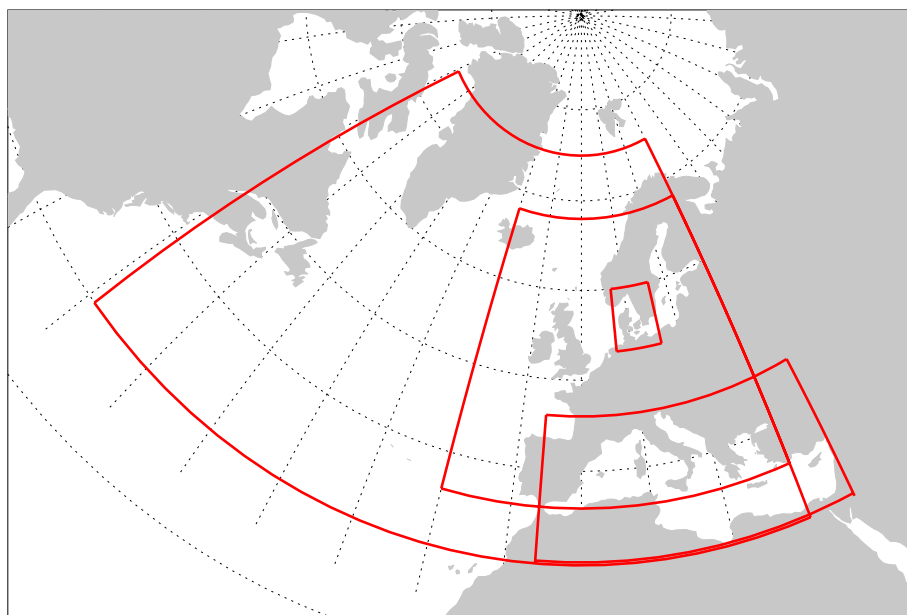


### 3 Modelopsætning

Herunder beskrives implementationen af WAM Cycle4 der anvendes i DMI's operationelle bølgemodel DMI-WAM.

#### 3.1 Beregningsnet

Det geografiske modelområde omfatter i alt 4 beregningsnet, som vist i fig. 1 og nærmere beskrevet i tabel 1. De 3 net er lagt inde i hinanden som en kinesisk æske (nesting), mens Middelhavet behandles som et lukket bassin.



**Figur 1.** DMI-WAM beregningsnet.

En nested model beregner prognoser for tre delområder:

- *Nordatlant-modellen:* En grovmasket model med maskevidde på  $\frac{1}{2}^\circ$ , der dækker Atlanten nord for  $30^\circ\text{N}$ , Middelhavet og Østersøen undtaget. Modellen drives af vindprognoser fra DMI's vejrmødel Hirlam G, og leverer randbetingelser til den fintmaskede model beskrevet herunder.
- *Nordsø-Østersø-modellen:* En fintmasket model der dækker Nordøst-Atlanten inkl. Nordsø-Østersø området med  $\frac{1}{6}^\circ$  opløsning. Modellen drives af vindprognoser fra DMI's vejrmødel Hirlam E, og modtager randbetingelser fra den grovmaskede

Model	Nordatlant	Nordsø-Østersø	Danske farv.	Middelhavet
Navn	NATLANT	NSB	IDF	MEDSEA
Rumlig opl.	1/2°	1/6°	1/30°	1/6°
Tidsskridt	10 min	4 min	1 min	2 min
Courant tal	0.78	0.65	0.61	0.17
Vejrmodel	Hirlam G	Hirlam E	Hirlam E	Hirlam E+G
- opløsn.	0.45°	0.15°	0.15°	0.15°/0.45°
Længder	69°W-30°E	20°W-30°E	7°E-16°E	6°W-36°E
Bredder	30°N-75°N	36°N-68°N	53°N-60°N	30.5°N-46°N
Åbne rande	JONSWAP	Nested	Nested	Closed basin
Gitterpunkter	199x91	301x193	271x211	253x94
Vandpunkter	11345	26234	18924	9516
Randpunkter ind	-	481	189	-
Randpunkter ud	161	39	-	-
Bathymetri	ETOPO5	ETOPO5	DYNOCS	ETOPO5

**Tabel 1.** DMI-WAM model setup.

model beskrevet herover. Den leverer randbetingelser til den meget fintmaskede model beskrevet herunder.

- *Danmarks-modellen:* En meget fintmasket model der dækker de danske farvande østpå til Bornholm med  $\frac{1}{30}^\circ$  opløsning. Modellen drives af vindprognoser fra DMI's vejrmodel Hirlam E, og modtager randbetingelser fra den fintmaskede model beskrevet herover.

En stand-alone model beregner prognoser for et enkelt havområde, der betragtes som et lukket bassin (udveksler ikke bølgeenergi med tilstødende bassiner):

- *Middelhavs-modellen:* En fintmasket model der dækker hele Middelhavet med  $\frac{1}{6}^\circ$  opløsning. Modellen drives af vindprognoser, kombineret fra DMI's vejrmodeller Hirlam E og Hirlam G.

Der er valgt den samme gitterafstand i grader i zonal og meridional retning. Gitterafstanden i km er derfor forskellig i de to retninger.

### 3.2 Bathymetri

Til de 3 grovmaskede modelområder anvendes den globale 5'\*5' ETOPO5 bathymetri. Til den fintnaskede Danmarks-model anvendes en bathymetri fra det EU-finansierede DYNOCS projekt [1] med opløsning på 1 sømil. DYNOCS bathyme-

trien er udarbejdet af DHI Water and Environment, med anvendelse af dybde data bl.a. fra Farvandsvæsenet. Begge bathymetrier er samlet til WAM beregningsnettene og lettere modificeret for at sikre numerisk stabilitet.

### 3.3 Datablokke

DMI-WAM regner kun i vandpunkter, hvor hele beregningsområdet behandles som én lang vektor. Det reducerer regnetiden væsentligt, at hele modeltilstanden kan opbevares i hukommelsen. Dette er indtil videre kun muligt på en supercomputer.

### 3.4 Atmosfærisk forcering

DMI-WAM forceres med timevise DMI-HIRLAM prognoser for 10m vind. De atmosfæriske felter interpoleres bilineært i rum og lineært i tid, fra vejrmodellens beregningsnet til WAM beregningsnettene.

Der anvendes data fra Hirlam-E og Hirlam-G versionerne, som begge anvendes i DMI's operationelle vejrudsigter. Hirlam-G omfatter hele Hirlam-E modelområdet, men i grovere rumlig opløsning; 45km vs. 15km på et roteret lat-lon net.

### 3.5 Refraktion

Der anvendes bundrefraktion men ikke strømrefraktion. DMI-WAM køres som en grundtvandsmodel, hvor bølgenes gruppehastighed afhænger af vanddybden. Der anvendes 52 prædefinerede dybder, logaritmisk fordelt fra mindstedybden  $H_{min}=5\text{m}$  med en afstandsfaktor på 1.1. På en given dybde interpoleres lineært i dette dybdearray.

### 3.6 Havis

Information om havis er ikke inkluderet. Der antages isfrit hav overalt.

### 3.7 Spektral diskretisering

DMI-WAM har en retningsopløsning  $\Delta\theta = 30^\circ$ , således at bølgeenergien beregnes for retningerne  $0^\circ$  (=true north),  $30^\circ$ , ...,  $330^\circ$ .<sup>1</sup>

Modellens 25 frekvenser er logaritmisk fordelt efter formlen

---

<sup>1</sup>Eksperimenter ved UKMO har vist (pers. komm.) at det kan være en fordel at dreje retningerne  $\frac{1}{2}\Delta\theta$ , væk fra modellens principale akser, så retningerne bliver  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ , ...,  $345^\circ$ . Dette er ikke implementeret i DMI-WAM.

$$f_n = (1.1)^n f_1$$

så den højfrekvente del af spektret er bedst opløst. Den laveste frekvens  $f_1 = 0.04177 Hz$  svarer til en bølgeperiode på 23.54s og en gruppehastighed  $c_g = 18.7 m/s$  på dybt vand. Dette er modellens største forplantningshastighed for energi. Den højeste frekvens  $f_{25} = 0.41145 Hz$  svarer til en periode på 2.43s.

### 3.8 Tidsskridt

Modellens tidsskridt er valgt ud fra stabilitetskrav. For Middelhavsmodellen har det vist sig nødvendigt at reducere tidsskridtet yderligere i forhold til dette krav. Det skyldes bathymetriens udformning, med stejle skrænter nær ved visse øer.

### 3.9 Koldstart og initialisering

DMI-WAM er koldstartet en gang for alle med fuldt udviklet sø, hvor bølgespektret i hvert gitterpunkt er parametriseret med anvendelse af den lokale vind og et maksimum fetch på 30 km. Hertil anvendes JONSWAP spektret, som er nærmere beskrevet i [3],[2].

Koldstarten er fejlbehæftet (typisk for meget sø og for lidt dønning), og først efter ca. et døgn er prognoserne anvendelige. Alle følgende modelkørsler initialiseres med output fra en tidligere kørsel (hotstart), så havets forhistorie føres med over fra kørsel til kørsel. Reinitialisering er kun nødvendig ved driftforstyrrelser eller opgradering.

### 3.10 Åbne rande

Nordatlantmodellen anvender JONSWAP spektret. Maksimal fetch er sat til 30 km. Undermodellerne er nastede, og anvender tids/rum-interpolerede spektre beregnet med den grove model. Middelhavsmodellen anvender ingen randbetingelser.

### 3.11 Output

Integrerede bølgeparametre (se tabel 2) gemmes for hver hele time i bitmap komprimeret GRIB format. Felterne har en trunkeringsfejl i gitterafstanden, der kodes i tusindedele grader. Dette kan være af betydning for grafiske og andre applikationer, der anvender disse data.

Param	Id	Beskrivelse
$H_s$	229	Signifikant bølgehøjde
$\theta$	230	Middelbølgeretning
$T_p$	231	Dominerende bølgeperiode
$T_z$	232	Middelbølgeperiode
$C_D$	-	Drag koefficient
$H_{ws}$	-	Højde af sø
$\theta_{ws}$	-	Retning af sø
$T_{ws}$	-	Periode af sø
$H_{sw}$	237	Højde af dønning
$\theta_{sw}$	238	Retning af dønning
$T_{sw}$	239	Periode af dønning
$\beta$	240	Charnock tal (ruhed)
$U_*$	-	Friktionshastighed
$U_{10}$	-	Vindhastighed
$\tau_w/U_*^2$	-	Normaliseret bølgestress
$S$	-	Stejlhed af bølger

**Tabel 2.** DMI-WAM output parametre. Kun variable tildelt et *id* bliver arkiveret.

## 4 Afvikling

DMI-WAM bliver afviklet 4 gange dagligt på DMI's supercomputer NEC/SX6. Der beregnes timevise bølgeprognoser fra +1 til +54 timer 4 gange i døgnet, med analyse 00, 06, 12 og 18 UTC.

Tid (UTC)	WAM kørsel
02:20	00+54h
03:25	Slut
08:20	06+54h
09:25	Slut
14:20	12+54h
15:25	Slut
20:20	18+54h
21:25	Slut

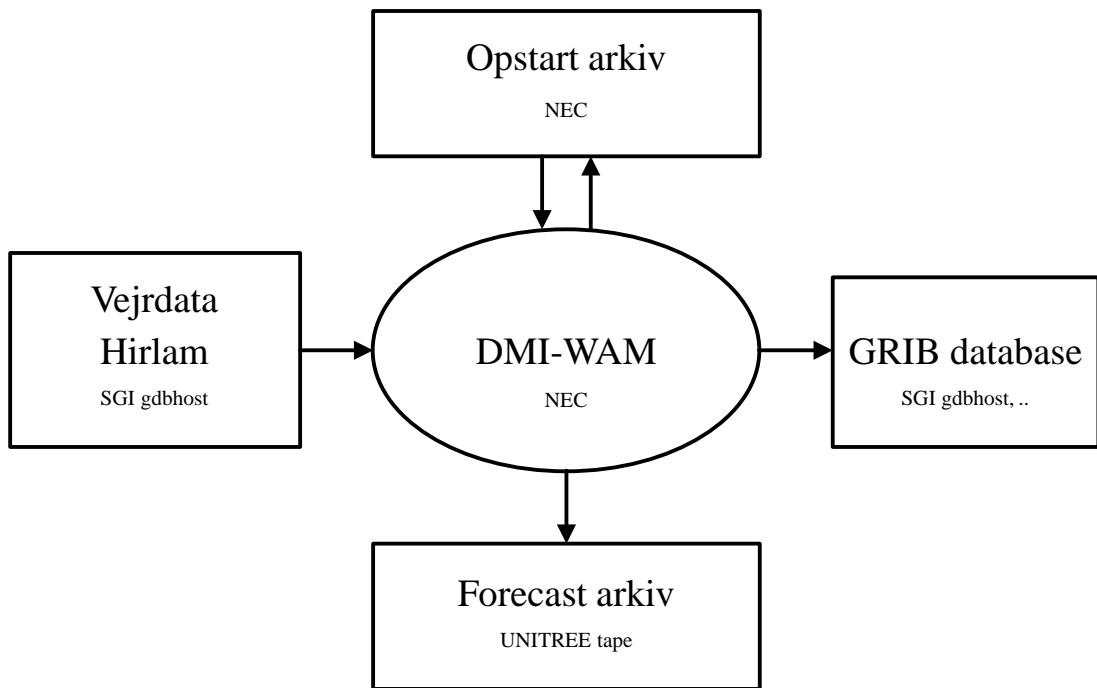
Afviklingen foregår vektoriseret på en enkelt processor. Input fra DMI's vejrmødel læses fra en GRIB database, og bølgeprognoser i form af GRIB-filer sendes til DMI's operationelle GRIB database(r) med kopi til arkivering på bånd (UNITREE). Foruden bølgefelter i GRIB format arkiveres tidsserier for en række prædefinerede stationer, hvor bølgeobservationer sker regelmæssigt (se fig. 3). Samlet output fylder ca. 65 Mb pr. kørsel.

DMI-WAM er koldstartet en gang for alle. Hver kørsel gemmer opstartsfiler til brug for den næste kørsel. Opstartsfilerne indeholder det fulde bølgespektrum 6 timer inde i simuleringen, dvs. gældende for næste analysetid. Alle kørsler skal afvikles for at få skabt de nødvendige opstartsfiler. Hvis systemet har været standset, køres de manglende simuleringer automatisk som 6-timers kørsler.

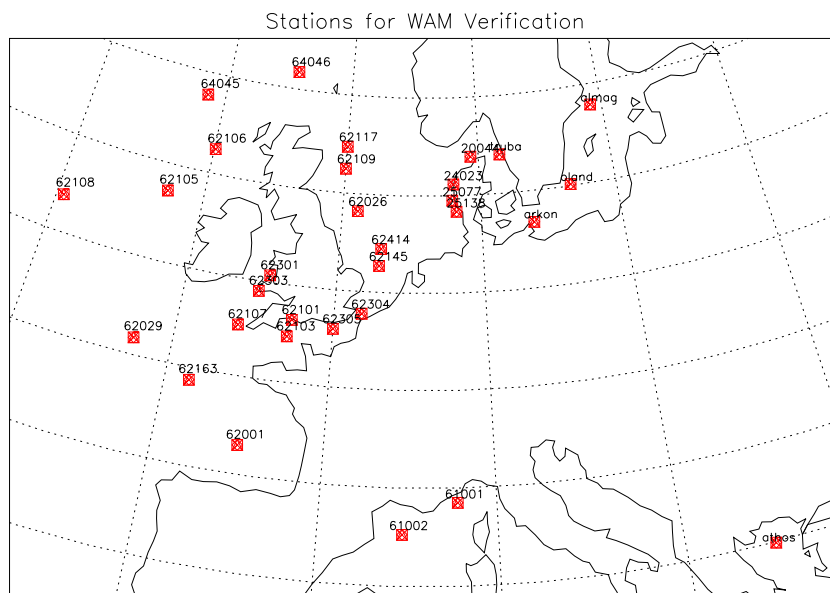
Opstartsfiler og inputfiler til forcering arkiveres ikke. Opstartsfilerne gemmes i 3 døgn, og forcerings-filer overskrives ved hver ny kørsel.

DMI-WAM anvender ikke observerede bølgedata.

Rand-modulet skriver ikke randfiler gældende til første tidsskridt. Det betyder, at 2. nestingniveau først er startet op ved anden kørsel af systemet, 3. nestingniveau ved 3. kørsel.



**Figur 2.** Flow diagram for DMI-WAM.



**Figur 3.** Bølgemålere.

## Litteratur

- [1] J. Weiergang (ed.). Dynocs final report. Technical report, Dansk Hydraulisk Institut, 1997.
- [2] G. Komen et al. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, 1994.
- [3] The SWAMP group. *Ocean Wave Modelling*. Plenum Press, New York, 1985.
- [4] H. Günther, S. Hasselmann, and P. Janssen. Wamodel cycle4 (revised version). Technical Report 4, Deutsches Klimarechnenzentrum, 1992.