

**DANMARKS METEOROLOGISKE  
INSTITUT**

**— TEKNISK RAPPORT —**

**01-02**

**DMIs operationelle  
stormflodsvarslingsystem  
Version 2.0**

**Jacob Woge Nielsen**

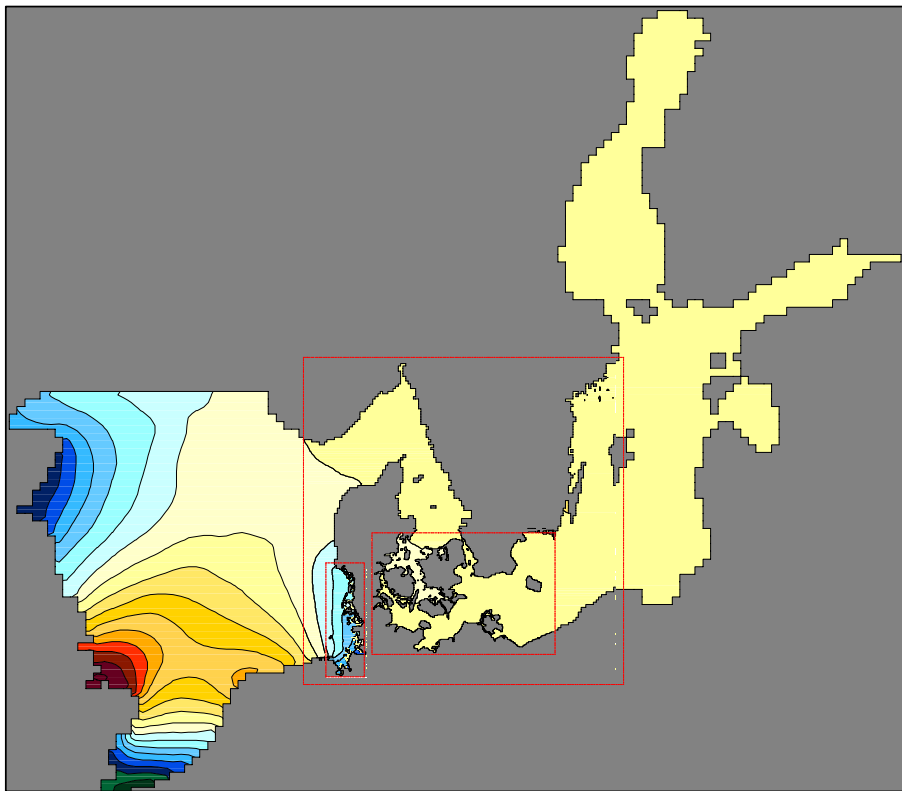


**København 2001**

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

# DMI's operationelle stormflodsvarslingsystem Version 2.0

Jacob Woge Nielsen  
DMI/VO



2000/12/18 00:00:00

# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Mike21</b>	<b>5</b>
2.1	Fladvandsligningerne . . . . .	5
2.2	Diskretisering . . . . .	6
2.3	Tidslig integration . . . . .	6
2.4	Nesting . . . . .	7
2.5	Model output . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Modelopsætning</b>	<b>8</b>
3.1	Beregningsnet . . . . .	8
3.2	Bathymetri . . . . .	9
3.3	Flooding/drying . . . . .	9
3.4	Atmosfærisk forcering . . . . .	10
3.4.1	Hirlam forcering - primær opsætning . . . . .	11
3.4.2	UK-lam forcering - sekundær opsætning . . . . .	11
3.4.3	ECMWF forcering . . . . .	11
3.4.4	Vindstress parametrisering . . . . .	11
3.4.5	Luftryk . . . . .	12
3.5	Tidevand langs åbne rande . . . . .	12
3.5.1	Tidevand langs nordranden . . . . .	13
3.5.2	Tidevand langs sydranden . . . . .	13
3.6	Floder . . . . .	14
3.7	Bundfriktion . . . . .	14
3.8	Lateral friktion . . . . .	14
3.9	Tidsskridt . . . . .	15
3.10	Koldstart og initialisering . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Postprocessering af vandstand</b>	<b>16</b>
4.1	Glatning . . . . .	16
4.2	Tidevand . . . . .	17
4.2.1	Modeltidevand . . . . .	17
4.2.2	Astronomisk tidevand . . . . .	17
4.3	Nulpunktskorrektion . . . . .	18
4.4	Filtrering . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Afvikling</b>	<b>20</b>

<b>6</b>	<b>Appendix</b>	<b>22</b>
6.1	Tidevand langs nordranden . . . . .	22
6.2	Tidevand langs sydranden . . . . .	22
6.3	Danske vandstandsstationer . . . . .	23
6.4	Danske stationer med numerisk instabilitet . . . . .	24
6.5	Stationer uden tidevandsprocessering . . . . .	24

# 1 Indledning

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) kører et numerisk stormflodsvarslings-system kaldet *DKSS98* operationelt. Formålet med modelkørslerne er at beregne vandstanden langs de danske kyster, primært for at kunne varske de relevante myndigheder i god tid inden en eventuel forhøjet vandstand. Systemet forsyner DMIs farvandsvagt med vandstandsprognoser, og farvandsvagten har ansvaret for at kontakte de lokale myndigheder. Prognoserne bliver også sendt videre til brugere udenfor DMI (Kystdirektoratet, havnemyndigheder m.v.). Endvidere offentliggøres korttidsprognoser på Internettet. *DKSS98* prognoserne for vandstand og strøm finder også anden anvendelse, fx som input til DMIs oliespildsberedskab.

*DKSS98* står for Danmarks StormflodsSystem 1998, hvor årstallet henfører til at systemet første gang blev kalibreret på kalenderåret 1998. Systemet løser ligningerne for transport af vand og de deraf følgende vandstandshævninger og -sænkninger, forårsaget af vind, lufttryk og tidevand, på et 2-dimensionalt beregningsnet der dækker hele Nordsø-Østersø området med speciel fokus på de danske farvande. Systemet får sit primære input fra DMIs numeriske vejrmodel *HIRLAM-E*, og bliver afviklet dubleret på to Silicon Graphics tvilling-maskiner af hensyn til driftssikkerheden.

Kernen i systemet er den hydrodynamiske model *Mike21*, som er udviklet af DHI - Institut for Vand og Miljø. *Mike21* er stillet til rådighed for DMI i kompileret stand til brug for stormflodsvarsling og afledede aktiviteter, og DMI har således ikke adgang til eller ansvar for kildeteksten. Samarbejdet med DHI inden for stormflodsvarsling har fundet sted siden 1990.

## 2 Mike21

Den hydrodynamiske model Mike21 er udførligt beskrevet i [1], og her gives kun et kort resume. Mike21 er en vertikalintegreret hydrodynamisk model, som løser de såkaldte fladvandsligninger (shallow-water eller Saint-Venant ligninger). De prognostiske variable er

$\zeta$  = vandstand

$p$  = transport af vand i x-retningen

$q$  = transport af vand i y-retningen

Der er ingen beskrivelse af strømmens variation med dybden, og modellen skelner ikke mellem ferskvand og havvand af forskellig saltholdighed.

### 2.1 Fladvandsligningerne

De styrende ligninger er formuleret i Cartesiske koordinater, med anvendelse af hydrostasi og Boussinesq approximationen:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} + fq &= -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_w^x}{\rho} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - r \frac{p \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] \\ \frac{dq}{dx} - fp &= -gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_w^y}{\rho} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - r \frac{q \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

hvor  $f$  er Coriolisparameteren (breddegradsafhængig),  $g$  tyngdeaccelerationen,  $\vec{\tau}_w = (\tau_w^x, \tau_w^y)$  er vindstresset og  $p_a$  lufttrykket,  $h = \zeta + H$  er den totale vanddybde,  $r$  er bundfriktionskoefficienten og  $\rho$  er vands densitet.  $\tau_{ij}$  er effektive shear stress komponenter.

Alle friktionsled parametriseres. Vindfriktionen beregnes ud fra vindhastigheden  $\vec{U}$  ved

$$\vec{\tau}_w = C_d \rho_a \vec{U}_{10} |\vec{U}_{10}|$$

hvor  $C_d(|\vec{U}|)$  er en vindhastighedsafhængig drag koefficient. Bundfriktionen er givet ved en Chezy formulering

$$r = \frac{g}{C^2}$$

hvor Chezy koefficienten  $C$  analogt med formuleringen i rørhydraulik kan udtrykkes som en kombination af Manning tallet  $M$  og den lokale vanddybde

$$C = M * h^{\frac{1}{6}}$$

Manningtallet specificeres for hvert enkelt gitterpunkt i modellen.

Den laterale friktion er givet ved

$$\tau_{ij} = \rho \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

hvor eddy viskositeten  $\nu_t$  parametriseres som en funktion af det lokale hastighedshear (Smagorinsky formulering)

$$\nu_t = C_{sm} \delta x \delta y \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}$$

$C_{SM}$  er Smagorinsky koefficienten.

Modelparametrene  $C_d$ ,  $M$  og  $C_{SM}$  er kalibreringskonstanter.

## 2.2 Diskretisering

Mike21 regner på en *finit differens* udgave af fladvandsligningerne, diskretiseret på et Arakawa C gitter. Der benyttes en UTM projektion.

## 2.3 Tidslig integration

Den tidslige integration i Mike21 foregår med et ADI (Alternating Direction Implicit) skema (nærmere beskrevet i [1]). Skemaet er fuldt implicit og dermed ubetinget stabilt, dvs. der er ikke en numerisk øvre grænse på længden af tidsskridtet. Imidlertid bliver modelberegningerne mere præcise jo kortere tidsskridt man anvender. En retningslinie for tidsskridtet kan fås ud fra Couranttallet, defineret som

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \sqrt{gH}$$

DHI anbefaler en højeste værdi af Couranttallet på ca. 5, i snævre kanaler dog kun op til ca. 1. Herudfra bestemmes det længste praktisk anvendelige tidsskridt.



## 2.4 Nesting

Mike21 gør brug af 2-vejs nesting, hvilket vil sige at flere beregningsnet lægges inden i hinanden, med successivt finere opløsning. Der er vekselvirkning både fra det grove net til det fine og tilbage fra det fine net til det grove. For hvert finere beregningsnet reduceres gitterafstanden med en faktor 3.

## 2.5 Model output

Hver modelberegning gemmer, foruden den uforstyrrede vanddybde  $H$ , de prognostiske variable  $\zeta$ ,  $p$  og  $q$ . Herudfra kan udledes ved brug af den lokale dybde  $H$

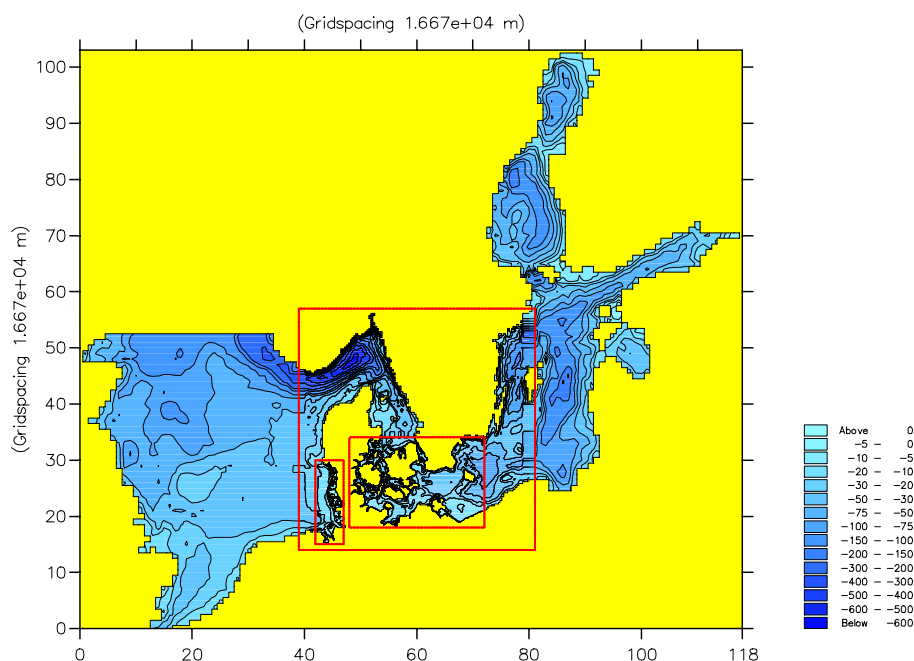
$$\begin{aligned}h &= \zeta + H && \text{total vanddybde} \\u &= p/h && \text{middel strøm i x-retningen} \\v &= q/h && \text{middel strøm i y-retningen}\end{aligned}$$

### 3 Modelopsætning

Herunder beskrives implementationen af Mike21 der anvendes i stormflodsvarslingsystemet DKSS98.

#### 3.1 Beregningsnet

Mike21 køres i en nested opsætning med i alt 4 beregningsnet:



Figur 1. DKSS98 beregningsnet.

- Det *regionale net* har en maskevidde på 9 sømil og dækker hele Østersøen, de indre danske farvande, og Nordsøen afgrænset med to åbne rande; i nord ved ca. 59°N (Shetland-Bergen), og i syd ved ca. 51°N (Engelske Kanal, Dungeness-Wissant).
- Det *lokale net* har en maskevidde på 3 sømil og dækker de indre danske farvande, den vestlige del af Østersøen østpå indtil Gotland, og den østlige del af Nordsøen ud til omtrent 6°Ø.
- *Bælthavsnettet* har en maskevidde på 1 sømil og dækker Bælthavet, den sydlige del af Kattegat til Grenå, og den vestlige del af Østersøen til øst for Bornholm.

- *Vadehavsnettet* har en maskevidde på 1 sømil og dækker den danske del af Vadehavet, samt en del af Tyske Bugt.

De fintmaskede net gør beregningen mere præcis i de områder de dækker. En lille maskevidde er nødvendig i Bælthavet for at få forbundet Nordsøen med Østersøen gennem Bælthavet.

Net	Total	Vand
Nordsø-Østersø	119x104	2357
Danske farvande	124x130	4331
Bælthavet	217x148	16369
Vadehavet	49x133	4011
i alt	67129	27068

Modellen har i alt 67129 gitterpunkter, hvoraf ca. 40% er vandpunkter. Antallet varierer under beregningerne, se nedenfor.

### 3.2 Bathymetri

Der anvendes en UTM-32 basis-bathymetri fra det EU-finansierede DYNOCs projekt med opløsning på 1 sømil. DYNOCs bathymetrien er udarbejdet af DHI, med anvendelse af dybde data bl.a. fra Farvandsvæsenet. Bathymetrien har i alt 1051\*951 datapunkter, og dækker hele DKSS98 modelområdet. Bathymetriens origo falder sammen med modellens origo i UTM-koordinaterne (east,north) = (-277840,5667120) svarende til (2°00'41"W,50°36'55"N). I de grove beregningsnet er udvalgt hvert 3. hhv. hvert 9. punkt i begge retninger. I Vadehavet er der anvendt nyere data fra Kystinspektoret (1998/99), som har målt op i et 25m x 100m net. Herudfra er der konstrueret en 1 sømils bathymetri for dette område. Der er justeret på dybderne lokalt, specielt i Vadehavet, Øresund og Storebælt, for at få de rigtige tværsnit i de snævre kanaler. Lister Dyb og Grådyb, samt nærområdet ved slusestationerne i Vadehavet har krævet en særlig behandling.

### 3.3 Flooding/drying

Mike21 har indbygget flooding/drying, hvorved meget lavtliggende områder kan skiftevis oversvømmes og udtørres. Der er både tale om lavtliggende land i po-

sitiv kote, som oversvømmes, og om grunde områder i negativ kote (vader), som udtørres. Der specificeres to vanddybder, som angiver ved hvilken vanddybde et givet område udtørres, hhv. oversvømmes. Desuden specificeres koten for ægte land. I DKSS98 er disse dybder sat til:

Land	Flooding	Drying
8.0 m	0.4 m	0.2 m

Alle modelpunkter under landkote kan i princippet oversvømmes. I praksis er der tale om dele af Vadehavet, samt enkelte andre gitterpunkter.

### 3.4 Atmosfærisk forcering

Mike21 forceres med prognoser for 10m vind og msl tryk. Der er optimalt adgang til atmosfæriske felter gældende for hver hele time, med analyse hver 6. time i hindcasten. For tider ind imellem interpoleres lineært. De atmosfæriske felter er til rådighed på vejrmodellens beregningsnet, som ikke falder sammen med Mike21 beregningsnettene. For at få vind- og trykfelterne bragt fra vejrmodellens net ned på Mike21s UTM-32 net, interpoleres bilineært til Mike21 9 sømle nettet.

Modelligningerne kan også formuleres så forceringen i overfladen foreskrives i form af vindstress i stedet for 10m vind. Benytter man observationer til at drive modellen, er 10m vind at foretrække da man sjældent har adgang til observeret vindstress. Driver man derimod modellen med output fra en vejrmodel, er vindstress et mere oplagt valg, fordi det i modsætning til 10m vinden er en prognostisk modelvariabel. I Mike21 kan der imidlertid kun foreskrives 10m vind til at forcere modellen.

Der er adgang til prognoser fra 3 forskellige vejrmodeller, som angivet i tabellen herunder.

Vejrmodel	Hirlam-E primær	UK-lam sekundær	ECMWF reserve
Tidslig opl.	1 time	6 timer	6 timer
Rumlig opl.	0.15° rot. lat/lon	1.25° lat/lon	1.5° lat/lon
Analyse step	6 timer	12 timer	12 timer
Prognoselængde	2 døgn	1.5 døgn	7 døgn

### 3.4.1 Hirlam forcering - primær opsætning

I den primære opsætning af DKSS98 drives Mike21 med prognoser fra DMIs egen vejrmodel Hirlam-E [4]. Der anvendes prognoser for vindstress, dvs. Hirlams bundstress, samt for msl tryk. Der arkiveres en speciel vind sideløbende med den sædvanlige 10m vind, til brug for stormflodsmodellen. Denne vind beregnes ved at invertere drag formuleringen anvendt i Mike21 (se herunder), hvorved det sikres at overfladestresset der påtrykkes Mike21 nøje svarer til Hirlams bundstress. Afhængigt af grænselagsformuleringen i Hirlam kan den tilsvarende vindstyrke afvige fra 10m vinden med indtil et par m/s.

### 3.4.2 UK-lam forcering - sekundær opsætning

I den sekundære opsætning af DKSS98 drives Mike21 med prognoser fra den engelske vejrmodel UK-lam. Der anvendes prognoser for 10m vind samt for msl tryk. 10m vinden kan forstærkes kunstigt med 10% over Nordsøen og med 1-2 m/s i Bælthavet, for at kompensere hhv. for den grove tidslige opløsning og for effekt af land-hav grænserne, som kunstigt formindsker vindstyrken over hav i områder med meget land. Denne forstærkning er p.t. ikke i anvendelse.

### 3.4.3 ECMWF forcering

10m vind og msl tryk fra ECMWFs globale model benyttes i tilfælde af at

- Hirlam/UK-lam prognoser ikke er til rådighed
- der skal beregnes prognoser ud over 2 døgn

Vandstandsprognoser baseret på ECMWF benyttes ikke til stormflodsvarsling.

### 3.4.4 Vindstress parametrisering

Vindstresset beregnes ud fra 10m vinden ved brug af formlen

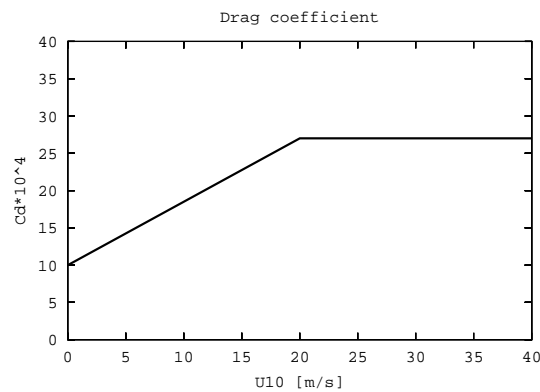
$$\vec{\tau}_w = C_d \rho_a \vec{U}_{10} |\vec{U}_{10}|$$

hvor luftens densitet

$$\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

således at  $\rho_a/\rho = 1/800$ . Dragkoefficienten  $C_d$  afhænger af 10m vindstyrken

$$C_d) = \begin{cases} (1.0 + U_{10} * 0.085) * 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 20m/s \\ 2.7 * 10^{-3} & \text{for } U_{10} > 20m/s \end{cases}$$



**Figur 2.** Drag koefficient.

Luftens densitet regnes konstant, og der tages ikke højde for effekten af vindgenererede bølger samt stabilitetsforholdene i den nedre del af atmosfæren, når Mike21 drives med 10m vind.

### 3.4.5 Luftryk

I de styrende ligninger indgår luftrykket kun ved sin horisontale gradient. Derudover har luftrykket langs modellens åbne rande betydning for det påtrykte vandstands niveau, idet randbetingelsen fås som den samlede effekt af det astronomiske tidevand  $\zeta_{astro}$  og invers barometer

$$\zeta_{rand} = \zeta_{astro} - \frac{1}{g\rho}(p_{air} - p_{neut})$$

hvor

$$p_{neut} = 1013 \text{ hPa}$$

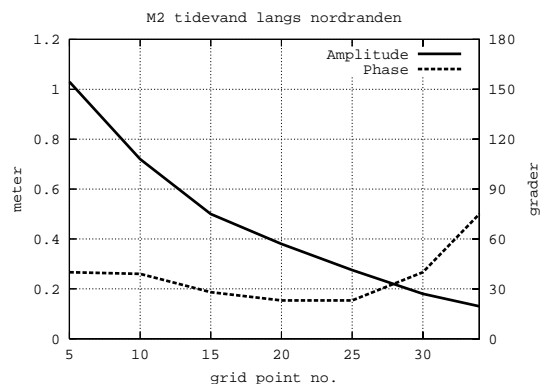
### 3.5 Tidevand langs åbne rande

Det atlantiske tidevand specificeres langs modellens åbne rande i hhv. den sydlige og den nordlige del af Nordsøen. Det vil sige at alt tidevand i de indre danske farvande og i Østersøen stammer fra disse randbetingelser - der skabes ikke noget

tidevand internt i Østersøen. Strømretningen ved indstrømning specificeres også, mens modellen selv beregner strømmen langs med de åbne rande ved udstrømning.

### 3.5.1 Tidevand langs nordranden

Det atlantiske tidevand langs Shetland-Bergen snittet er foreskrevet som en superposition af 10 tidekonstituenters af daglig, halvdaglig eller kvartdaglig type, aflæst fra en tysk analyse af tidevandet i Nordsøen der stammer fra 2. verdenskrig. De 10 konstituenters  $M_2, S_2, N_2, K_2, \mu_2, K_1, O_1, P_1, M_4, MS_4$  specificeres (amplitude og fase) i 7 punkter langs den åbne rand (M2 er vist i fig. 3 herunder). Der anvendes et DHI tideprediktionsprogram baseret på Foreman's analysemetode [2] til at beregne en x-t matrix for tidevandet langs hele randen, og der interpoleres lineært mellem de enkelte punkter så tidevandet bliver beskrevet i samtlige 34 randpunkter. Konstituentene ses i Appendix. Indstrømningsretningen er  $0^\circ$ , dvs. vinkelret på randen.



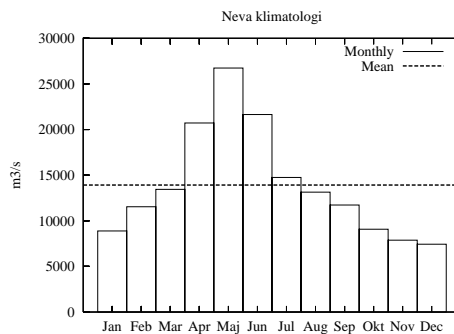
**Figur 3.** M2 tidevand langs nordranden. Shetlandøerne til venstre, Bergen til højre

### 3.5.2 Tidevand langs sydranden

Tidevandet i den Engelske Kanal er taget fra Admiralty Tables 1995, hvor tidekonstituenters for en lang række havne publiceres hvert andet år. Stationerne Dungeness (engelsk) og Wissant (fransk) ligger tilstrækkelig tæt på modellens randpunkter til at kunne anvendes. For tidevandet i rum sø interpoleres lineært mellem kystværdierne. De 4 konstituenters  $M_2, S_2, K_1, O_1$  specificeres i Admiralty Tables, sammen med to modulationers f4 og f6 med hhv. 6- og 4-timers periode. Konstituentene ses i Appendix. Indstrømningsretningen er drejet  $37^\circ$  med uret, således at strømmen løber i nordøstlig retning, omtrent langs kanalens længdeakse.

### 3.6 Floder

Der specificeres en netto tilførsel af vand til modellen. For enkelheds skyld angives kun en enkelt kilde i Østersøen, nemlig floden Neva ved Skt. Petersborg, som måned for måned bliver tillagt det samlede klimatologiske netto ferskvandsbidrag til Østersøen (afstrømning minus fordampning). I de indre danske farvande og i Nordsøen tilføres intet ferskvand.



Figur 4. Flodtilførsel fra Neva ved Skt. Petersborg.

### 3.7 Bundfriktion

Der anvendes en Manning formulering, hvor der i hvert gitterpunkt specificeres et Manningtal. Ved konstant Manningtal aftager bundfriktionen ganske svagt med stigende vanddybde. Der anvendes Manningtal mellem 2 og 50, med særlig høj friktion i Norske Rende samt andre dybe områder, som vist på fig. 5.

Der er tillagt en systematisk dybdeafhængighed. Desuden er bundfriktionen øget kunstigt ned langs den jyske vestkyst for at optimere  $M_2$  fase og amplitude i dette område.

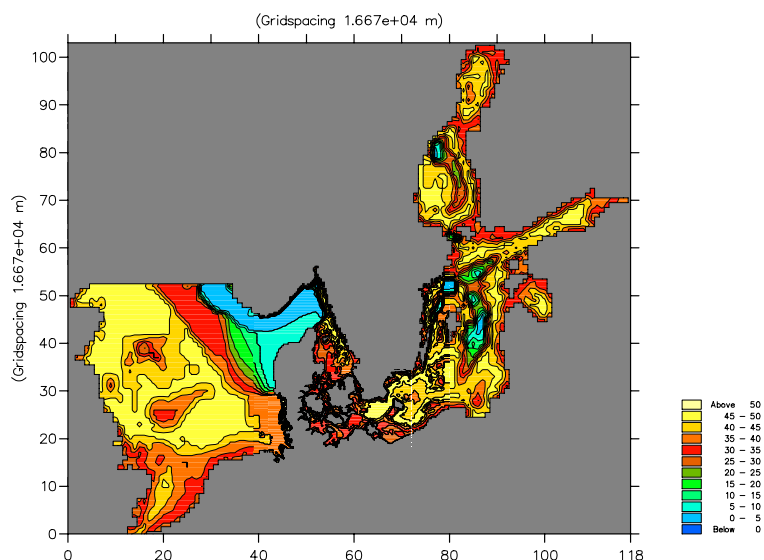
### 3.8 Lateral friktion

Der anvendes en Smagorinsky formulering, hvor den laterale friktion afhænger af det instantane lokale strømfelt. Smagorinsky koefficienten er sat til

$$C_{sm} = 0.3$$

Dette er en forholdsvis høj værdi, som har vist sig nødvendig for at fjerne numerisk instabilitet i forbindelse med overgangen mellem de forskellige beregningsnet (se "Postprocessing").





**Figur 5.** Bundfriktion givet som et Manningtal.

### 3.9 Tidsskridt

Model tidsskridtet er 5 minutter. Den maksimale dybde  $D$  i hvert beregningsnet og det maksimale Couranttal  $C$  er angivet i tabellen herunder.

Net	Max $D$	Max $C$
Nordsø-Østersø	632m	1.4
Danske farvande	650m	4.3
Bælthavet	99m	5.0
Vadehavet	37m	3.1

Med et maksimalt Couranttal omkring 5 i de indre danske farvande har modellen visse problemer med faseforholdene i dette område. Reducering af tidsskridtet til 1 minut ændrer faseforholdene mærkbart, men giver ikke en entydig forbedring.

Output arkiveres for hvert kvarter, hvilket svarer til frekvensen af vandstandsobservationerne (år 2000).

### 3.10 Koldstart og initialisering

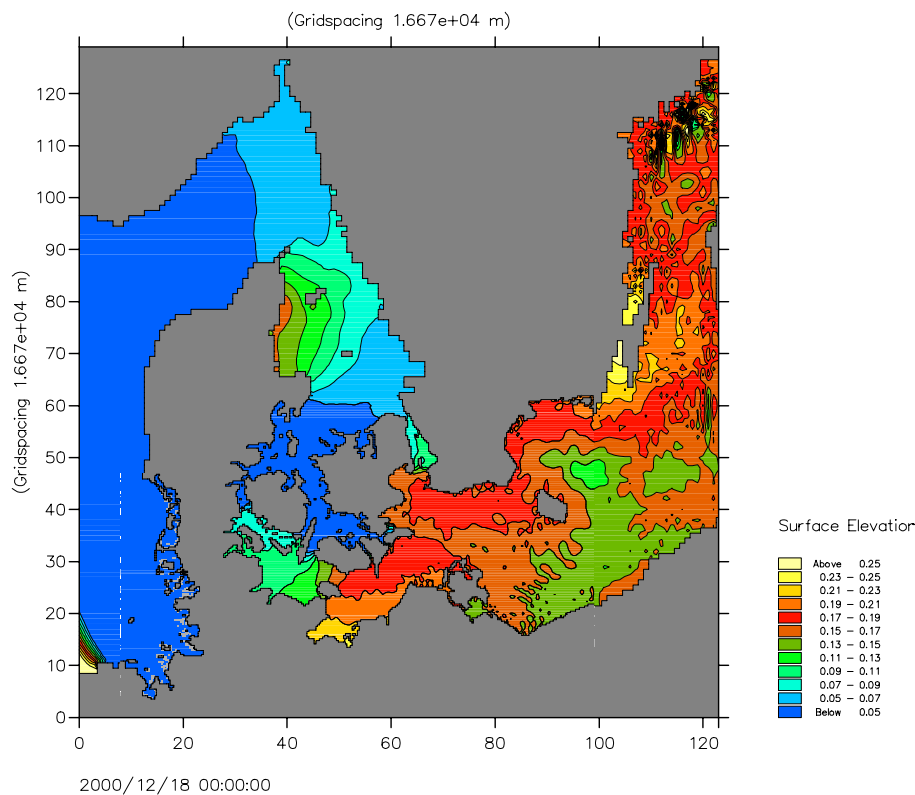
Mike21 er koldstartet medio august 2000 fra en starttilstand med fladt vandspejl og ingen strøm. I løbet af modellens første 6 timer blev der langsomt skruet op for forceringen til dens fulde styrke. Herefter er prognoserne anvendt. Alle følgende modelkørsler initialiseres med output fra en tidligere kørsel (hotstart).

## 4 Postprocessing af vandstand

De rå Mike21 prognoser for vandstand  $\zeta_t$  efterbehandles i fire trin: *glatning*, *tidevandsopretning*, *nulpunktskorrektion* og *filtrering*. De tre første trin udføres som et led i DKSS98 afviklingen, mens filtreringen er en løbende proces som foretages i varslingsapplikationen efterhånden som nye vandstandsobservationer modtages. De fire trin beskrives et for et herunder.

### 4.1 Glatning

Mike21 genererer numerisk støj ved overgangen mellem de forskellige beregningsnet. Støjen forsvinder så snart der er en vis bevægelse i vandet, men opstår igen når strømmene dør ud. Problemet findes derfor kun i Østersøen (værst i farvandet mellem Gotland og Sverige, se fig. 6) hvor der stort set ikke er noget tidevand.



Figur 6. Instabilitet i Mike21.

Vandstandsprognoserne for en række stationer i Østersøen (Arkonabassinet samt ved Bornholm, se Appendix) efterbehandles ved at filtrere med løbende 3-punkts tidsmiddel i 3 omgange, hvilket fjerner det meste af støjen. Filteret kan beskrives således:

$$\tilde{\zeta}_t = \frac{1}{27}(7\zeta_t + 6(\zeta_{t-1} + \zeta_{t+1})) + 3(\zeta_{t-2} + \zeta_{t+2}) + (\zeta_{t-3} + \zeta_{t+3})$$

hvor index  $t$  henviser til et output tidsskridt.

## 4.2 Tidevand

Fase- og amplitudefejl i modellens tidevand fjernes eller reduceres ved at fratække modeltidevandet og addere det astronomiske tidevand

$$\zeta_{pp} = \tilde{\zeta}_t - \zeta_{tide} + \zeta_{astro}$$

$\zeta_{tide}$  og  $\zeta_{astro}$  hentes fra et tidevandsarkiv. Korrektionen bruges ved de stationer hvor man har beregnet et astronomisk tidevand, og hvor det antages at forbedre prognosen. En undtagelse er slusestationerne i Vadehavet, hvor lavvande er meget dårligt beskrevet i analysen (se Appendix).

### 4.2.1 Modeltidevand

Modeltidevandet  $\zeta_{tide}$  beregnes for en måned ad gangen, den 15. i hver måned, ved at køre Mike21 uden anden forcering end tidevandsrandene. De resulterende vandstande ved hver station samles i et arkiv.

### 4.2.2 Astronomisk tidevand

Det astronomiske tidevand  $\zeta_{astro}$  er analyseret ved en række danske og udenlandske stationer. Analysen består i specifikation af amplitude og fase for de vigtigste tidekonstituenten ved hver station. Dette arbejde er koordineret med Farvandsvæsenet, som står for udgivelse af tidevandstabeller for de danske farvande. DMI beregner til eget brug tidevandet ved disse stationer med et kvarters opløsning, for et kalenderår ad gangen med programmet *tides*, udviklet ved DMI/V.

### 4.3 Nulpunktskorrektion

En eventuel forskel i middelvandstand ved de enkelte stationer mellem Mike21 og observeret vandstand fjernes ved at addere en *bias* til den postprocesserede prognose:

$$\zeta_{ub} = \zeta_{pp} + bias_{pp}$$

eller

$$\zeta_{ub} = \tilde{\zeta}_t + bias_{np}$$

Biasværdier for hver station er estimeret ud fra forskellen mellem Mike21 hindcast og observeret vandstand i 1998. Der anvendes to sæt af biasværdier, dels til opretning med forudgående tidevandskorrektion ( $bias_{pp}$ ), og dels til opretning uden forudgående tidevandskorrektion ( $bias_{np}$ ). For specifikation af biasværdier, se [3].

### 4.4 Filtrering

Efterhånden som vandstandsobservationer løber ind kendes fejlen på prognosen. Fejlen  $z_t$  fremskrives statistisk i tid ved brug af et autoregressivt (AR) filter. Filterkonstanterne ( $a_i$ ) er udviklet på 1 års hindcast ved hver station. Konstruktion af filtre for nye stationer er en ret tidskrævende proces, idet der helst skal bruges mindst 1 års observationer og prognoser.  $z_t$  bestemmes rekursivt for prognosetiderne  $t = 1, 2, \dots$  ved

$$z_t = \sum_{i=0}^m a_i z_{t-i}$$

For et 1. ordens filter ( $m = 0$ ) fås

$$z_t = a_0^t z_0$$

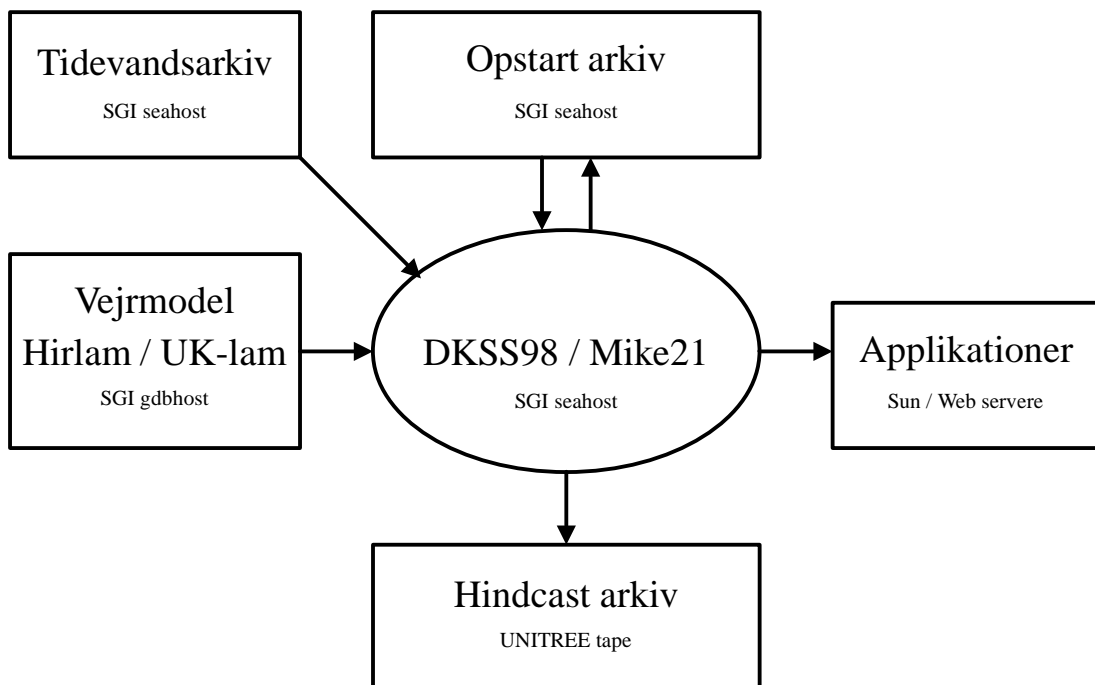
hvilket betyder at fejlen henfalder eksponentielt. For højere ordens filtre er forløbet af  $z_t$  mere kompliceret og ikke begrænset af fejlen til tiden  $t = 0$ . Vandstandsprognosen opdateres ved

$$\begin{aligned} \zeta_t &= \zeta_{obs} & \text{for } t \leq t_{obs} \\ \zeta_t &= \zeta_{ub} + z_t & \text{for } t > t_{obs} \end{aligned}$$

hvor  $\zeta_{obs}$  er den observerede vandstand og  $t_{obs}$  er tiden for den sidst modtagne observation. Metoden anvendes af kosmetiske årsager, da den løbende fjerner fejlen på hindcast delen af prognosen ved hver enkelt station, og derefter knytter an til den postprocesserede prognose med en glat kurve. Det har ikke kunnet dokumenteres at filtreringen faktisk forbedrer prognosen i tilfælde af stormflod.

## 5 Afvikling

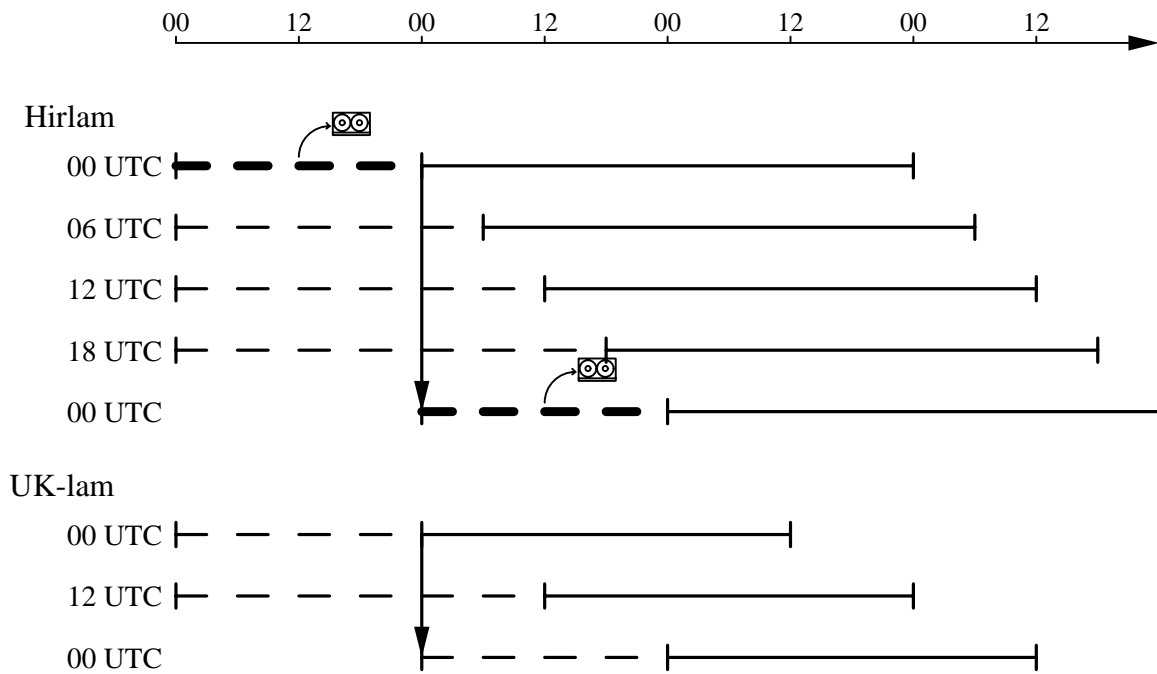
Det operationelle stormflodsvarslingssystem DKSS98 bliver afviklet dubleret på to skalare Silicon Graphics (SGI) maskiner. Dubleringen er foretaget af hensyn til driftssikkerheden. Der distribueres kun prognoser til videre brug fra den ene maskine med hostalias *seahost*. Vejrmodel input læses fra GRIB databasen på SGI maskinen med hostalias *gdbhost*.



DKSS98 tager omtrent 2 min. pr. døgn simulation at afvikle. Der skrives 72 Mb pr. døgn simulation til disk. En gang i døgnet gemmes de første 24 timer af simulationen (hindcast delen) på bånd. Dette arkiv strækker sig tilbage til midt i 90'erne. Desuden opbygges et arkiv af vandstandsprognoser for de enkelte stationer, som overføres til bånd en gang hver måned. Sideløbende med DKSS98 kørslerne vedligeholdes et tidevandsarkiv.

Tid (UTC)	Primær	Sekundær
02:20	00+48h	
03:00		00+36h
08:20	06+48h	
14:20	12+48h	
15:00		12+36h
20:20	18+48h	

Herunder: Mike21 afvikling. Hirlam opsætningen afvikles 4 gange i døgnet, og hindcasten delen (stiplet) arkiveres på tape 1 gang i døgnet. UK-lam opsætningen afvikles 2 gange i døgnet, og hindcasten arkiveres ikke. Forecasts (fuldt optrukket) for samtlige vandstandsstationer arkiveres for begge opsætninger.



## 6 Appendix

### 6.1 Tidevand langs nordranden

Fase	M2	S2	N2	K2	$\mu$ 2	K1	O1	P1	M4	MS4
5	320	359	293	355	220	175	041	168	013	107
10	321	003	300	002	232	185	045	180	045	142
15	332	009	310	012	245	191	048	187	084	173
20	337	014	318	017	256	195	052	189	120	203
25	337	010	318	014	265	196	053	190	147	230
30	320	350	303	350	272	195	050	188	182	262
34	285	325	270	320	275	188	036	185	217	288

Amp	M2	S2	N2	K2	$\mu$ 2	K1	O1	P1	M4	MS4
5	1.03	.300	.205	.078	.037	.096	.093	.034	.030	.025
10	.720	.225	.170	.063	.025	.079	.085	.028	.027	.023
15	.500	.185	.130	.050	.017	.063	.073	.022	.021	.020
20	.380	.160	.093	.038	.014	.050	.059	.018	.015	.016
25	.275	.125	.073	.029	.012	.039	.045	.014	.010	.013
30	.180	.080	.050	.021	.011	.026	.031	.010	.008	.010
34	.130	.050	.033	.015	.011	.017	.018	.006	.009	.009

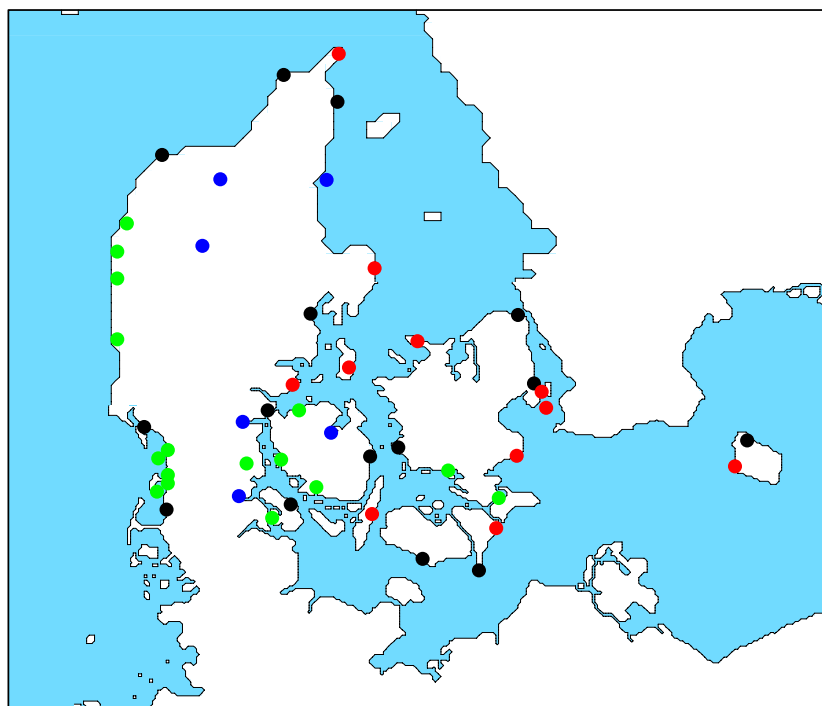
### 6.2 Tidevand langs sydranden

Fase	M2	S2	K1	O1	f4	f6
Dung	326	20	90	157	287	192
Wiss	334	27	120	136	283	183

Amp	M2	S2	K1	O1	f4	f6
Dung	2.64	0.86	0.07	0.04	0.037	0.002
Wiss	2.66	0.84	0.02	0.02	0.037	0.002



### 6.3 Danske vandstandsstationer



Figur 7. Danske vandstandsstationer.

Skagen	Hirtshals	Frederikshavn
Hals Barre	Hanstholm	Grenå
Århus	Juelsminde	Fredericia
Kolding	Thyborøn Kyst	Ferring
Torsminde Kyst	Torsminde Havn	Hvide Sande Kyst
Hvide Sande Havn	Esbjerg	Ribe
Mandø	Havneby	Brøns
Aabenraa	Ballum	Vidå
Fynshav	Sønderborg	Ballen
Bogense	Odense Fjord	Slipshavn
Assens	Fåborg	Spodsbjerg
Sjællands Odde	Korsør	Hornbæk
København	Nordre Røse Fyr	Drogden Fyr
Rødvig	Karrebæksminde	Kalvehave
Hesnæs	Rødby	Gedser
Tejn	Rønne	-

## **6.4 Danske stationer med numerisk instabilitet**

Hornbæk
København
Nordre Røse
Drogden
Rødvig
Hesnæs
Gedser
Rødby
Tejn
Rønne

## **6.5 Stationer uden tidevandsprocessing**

Ribe
Ballum
Vidå
Århus
Kolding
Ballen
Slipshavn
Spodsbjerg
Korsør

## Litteratur

- [1] DHI. *MIKE 21. User Guide and Reference Manual, Release 2.7*. Dansk Hydraulisk Institut, Hørsholm, Danmark, 1998.
- [2] M.G.G. Foreman. *Manual for tidal height analysis and prediction*. IOS, Victoria B.C., Canada, 1979.
- [3] Jacob Woge Nielsen. Verifikation af vandstandsprognoser: 1999. Technical Report 00-25, Danmarks Meteorologiske Institut, 2000.
- [4] Bent Hansen Sass, Niels Woetmann Nielsen, Jess U. Jørgensen, and Bjarne Amstrup. The operational DMI-HIRLAM system, 2nd rev. ed. Teknisk Rapport 99-21, DMI, København, Danmark, 1999.