Inundatiekaarten Westerschelde

L.C.G.J.M. Habets
ICTOO
Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit Wiskunde en Informatica
Postbus 513
5600 MB Eindhoven

1 Inleiding

In dit project zijn inundatiekaarten berekend aan de hand van de volgende gegevens:

(1) Lodingsgegevens van de Westerschelde in centimeters t.o.v. NAP, gemeten in een grid van 20 bij 20 meter. Geografisch gezien omvat het grid met meetgegevens het Westerscheldegebied tussen Vlissingen en de Belgische grens ten zuiden van Bath. Het mondingsgebied van de Westerschelde ten westen van Vlissingen is niet meegenomen.

(2) Tijdreeksen van waterstanden. Gebruikt zijn de tijdreeksen waarin gedurende een kalenderjaar iedere tien minuten de waterstand in centimeters t.o.v. NAP is geregistreerd. Hiervoor zijn de gegevens van de volgende meetstations gebruikt (van west naar oost):

- Vlissingen
- Terneuzen
- Hansweert
- Bath

De inundatiekaarten zijn berekend voor de kalenderjaren 1990, 1996 en 2001. Daarnaast is nog een inundatiekaart berekend voor 1990, waarin naast de lodingsgegevens uit 1990 nog een aanvulling van de lodingsgegevens is gebruikt, gebaseerd op metingen uit 1992. Deze lodingen zijn gecombineerd met de waterstanddata uit 1990.

2 Werkwijze

De eerste stap in de berekening is het bepalen van afstandenmatrices op het gegeven grid van de Westerschelde. In ieder punt waarvan een dieptemeting beschikbaar is, wordt de afstand bepaald tot de meetstations Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath, waarbij uitsluitend rekening wordt gehouden met de afstand langs de stroomrichting van de Westerschelde. Afstanden loodrecht op de stroomrichting blijven dus buiten beschouwing. Bovendien wordt

aan de afstanden een teken + of − toegekend, al naar gelang het lodingmeetpunt t.o.v. het waterstandmeetstation stroomopwaarts of stroomafwaarts gelegen is.

Op basis van de afstandsbepaling wordt de Westerschelde in vijf gebieden ingedeeld:

1. tussen Bath en de Belgische grens
2. tussen Hansweert en Bath
3. tussen Terneuzen en Hansweert
4. tussen Vlissingen en Terneuzen
5. ten westen van Vlissingen

In ieder punt waar een dieptemeting beschikbaar is, moet vervolgens een schatting gemaakt worden van de waterstand ter plaatse. In gebied 1 gebeurt dit uitsluitend op basis van de waterstand in Bath, omdat verder richting Belgische grens geen metingen beschikbaar zijn. In gebied 5 wordt alleen de tijdreeks van Vlissingen gebruikt. Gebied 5 blijkt relatief klein te zijn, omdat Vlissingen nagenoeg op de westelijke grens van het grid ligt. Derhalve is deze benadering een verantwoorde keuze. In de gebieden 2, 3 en 4 wordt een convexe combinatie van de beide tijdreeksen op de randen van het gebied gebruikt. Voor de bepaling van deze combinatie is de relatieve afstand tot de beide uiteinden van het gebied van belang. Daarom wordt voor ieder punt in de gebieden 2, 3 en 4 een getal $0 \leq \lambda \leq 1$ berekend als maat voor deze relatieve afstand. Als λ nagenoeg gelijk is aan 0 geeft dit aan dat het meetpunt in de buurt van de westelijke grens van het betreffende gebied ligt. Als λ nagenoeg gelijk is aan 1, dan ligt het meetpunt dicht bij de oostgrens van het gebied. Op deze manier wordt met een continu verlopende λ-waarde de locatie van een meetpunt binnen een gebied gecodeerd.

Met behulp van de gebiedsindeling en de berekende λ-waarde wordt in ieder gridpunt waar een dieptemeting beschikbaar is, een schatting van de waterstandreeks ter plaatse gemaakt. In de gebieden 1 en 5 wordt daarvoor simpelweg de gemeten tijdreeks in Bath, respectievelijk Vlissingen genomen, omdat verdere gegevens ontbreken. In de gebieden 2, 3 en 4 wordt de tijdreeks van waterstanden geschat op basis van de waterstandreeksen aan de uiteinden van het gebied, en de voortplantingssnelheid van de getijdegolf door het betreffende gebied. Deze berekening wordt hieronder in detail beschreven.

Gegeven zijn de waterstandreeksen aan de westelijke en oostelijke grens van een gebied, de tijd die de getijdegolf nodig heeft om zich door het gebied te verplaatsen, alsmede een gridpunt waarvan een dieptemeting beschikbaar is, in combinatie met de daar berekende waarde voor λ. Om berekeningen met de twee gemeten tijdreeksen nauwkeurig te kunnen uitvoeren, is het verstandig om ze eerst in tijd gelijk te schakelen, en de vertraging in de oostelijk gemeten waterstandreeks, ontstaan als gevolg van de voortplantingssnelheid in het betreffende gebied, te verwijderen. Vervolgens wordt een schatting van de waterstandreeks $w(t)$ in het gridpunt bepaald met

$$w(t) = (1 - \lambda) w_{\text{west}}(t) + \lambda w_{\text{oost, verschoven}}(t),$$

waarbij $w_{\text{west}}(t)$ de waterstandreeks in het westelijke meetstation voorstelt, terwijl de in tijd verschoven waterstandreeks in het oostelijke meetstation met $w_{\text{oost, verschoven}}(t)$ wordt aangeduid.

Tabel 1: Reistijd van getijdegolf in minuten

Jaar	1990	1996	2001
Hansweert-Bath	27	26	25
Terneuzen-Hansweert	22	22	22
Vlissingen-Terneuzen	19.5	19.5	20

Om inundatiepercentages te bepalen wordt tenslotte berekend welke fractie van de geschatte waterhoogtes in het gridpunt, onder respectievelijk boven de gemeten diepte liggen.

3 Resultaten

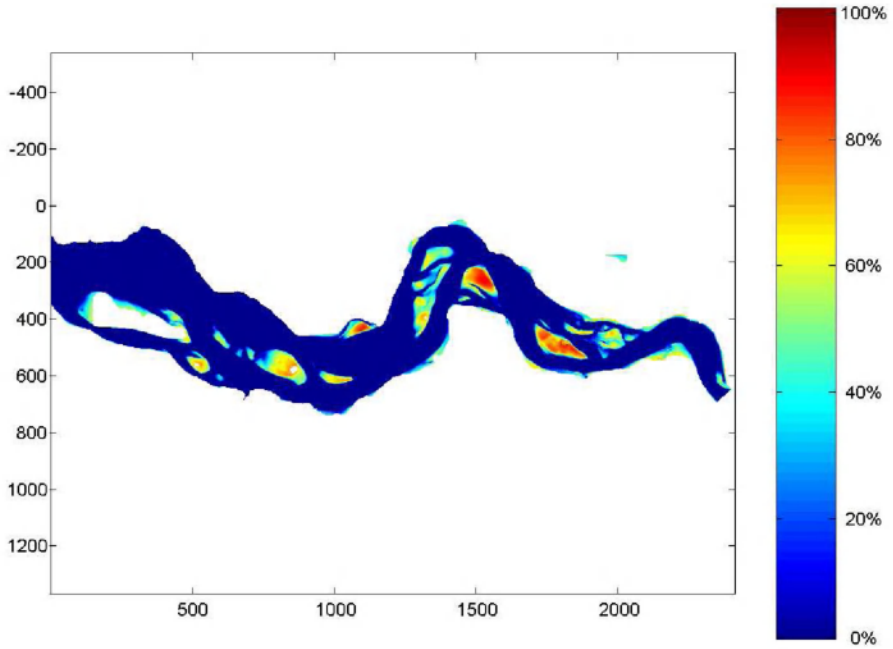
De in Paragraaf 2 beschreven werkwijze is voor drie jaren uitgevoerd: 1990, 1996 en 2001. Daarnaast is de methode nogmaals toegepast op een grid van lodingsgegevens uit 1990, uitgebreid op basis van lodingsgegevens uit 1992, om hiermee hiaten in de metingen rond de Hooge Platen en het Verdronken Land van Saeftinghe op te lossen. Bij de berekeningen is rekening gehouden met de snelheden van de getijdegolf (meer precies: de reistijd van de getijdegolf tussen twee waterstandmeetstations), zoals weergegeven in Tabel 1. Deze schattingen zijn gebaseerd op de resultaten van het rapport *A statistical analysis of travelling times and velocities of the tidal wave in the Western Scheldt* door A.V. Rosca, Technische Universiteit Eindhoven, 2003.

De aldus berekende inundatiekaarten zijn hierna afgedrukt. In deze kaarten is de droogvalfractie afgebeeld, oplopend van 0% (blauw, altijd onder water) naar 100% (rood, altijd boven water). De berekende grids met droogvalfracties zijn bovendien aan RIKZ afgeleverd in de vorm van ASCII-files. In deze files zijn meetpunten waarvoor geen lodingsgegevens beschikbaar zijn gecodeerd met -9999. Aan gridpunten waarvoor wel een dieptemeting beschikbaar is, is in deze files een geheel getal tussen 0 en 1000 toegekend. Dit getal geeft de fractie van de tijd aan, gemeten in pro mille, dat het desbetreffende meetpunt boven water staat. In het bijzonder geeft de waarde 0 aan dat het meetpunt altijd onder water staat, en het getal 1000 dat het meetpunt altijd boven water uitsteekt.

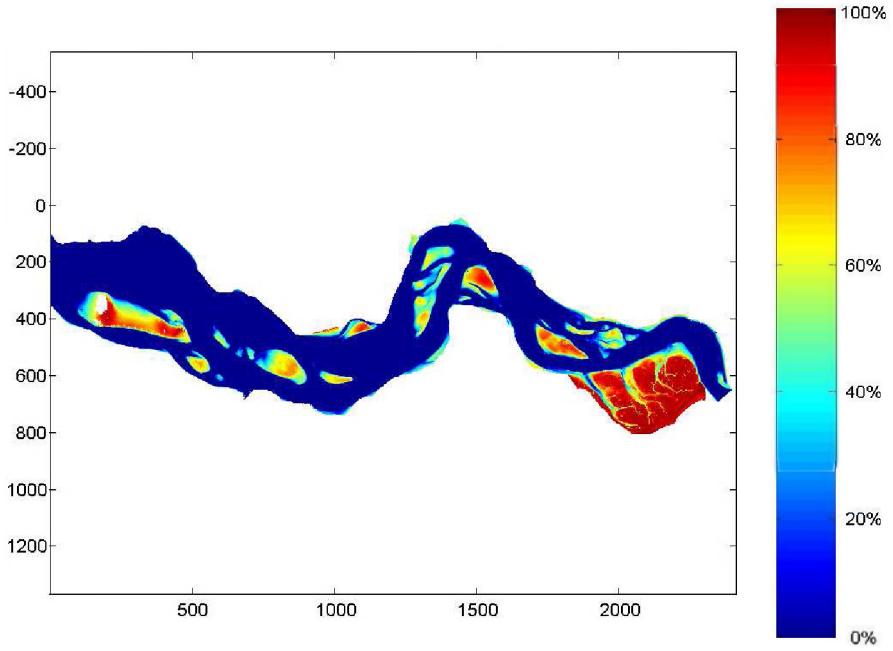
4 Matlab programmatuur

De berekeningen die nodig zijn voor het maken van de inundatiekaarten zijn uitgevoerd met het programma-pakket Matlab. Voor dit doel is speciale programmatuur ontwikkeld. In het bijzonder zijn de volgende Matlab-algoritmen geschreven:

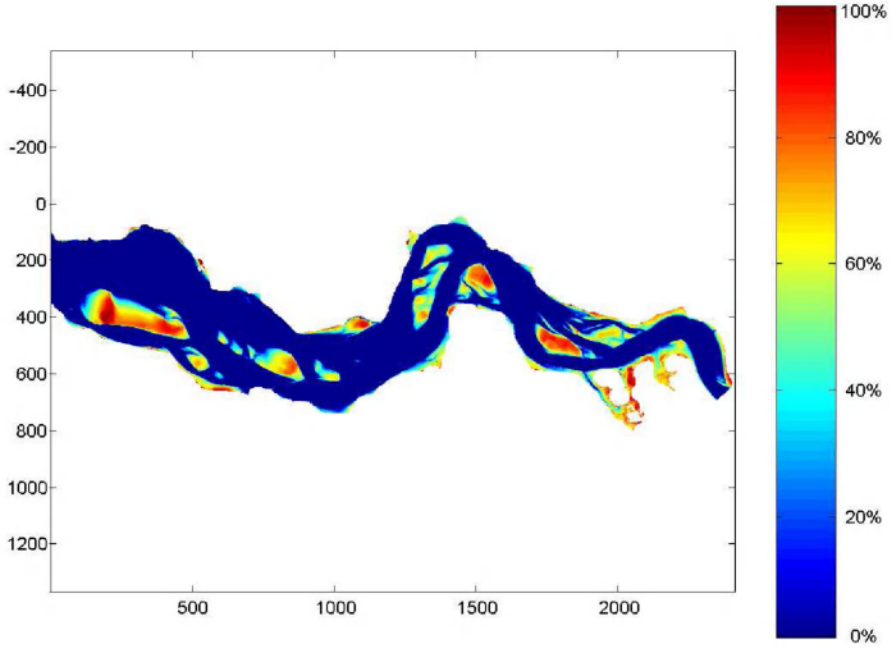
- `afstanden.m`
- `gebiedlambda2.m`
- `inundatie31.m`



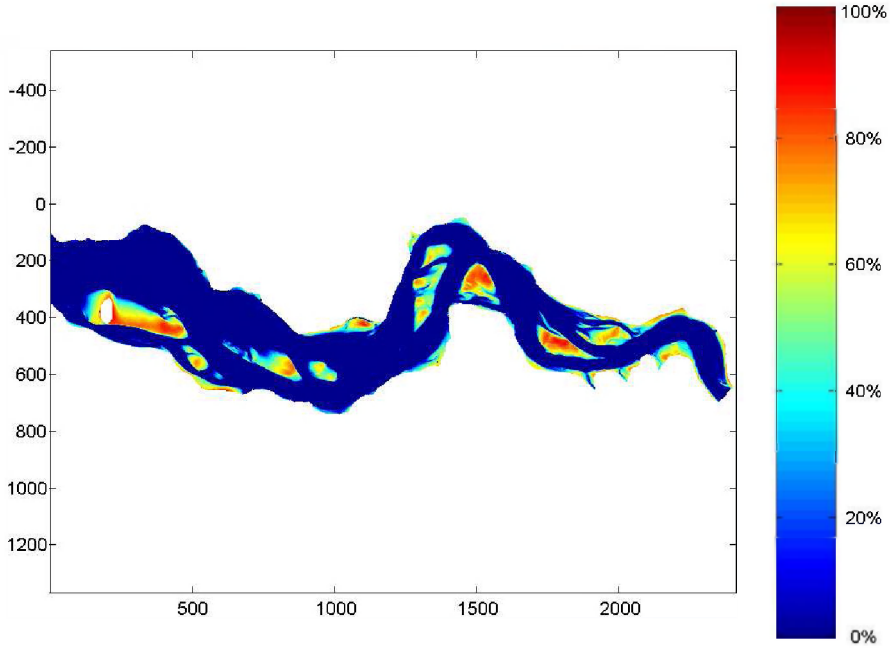
Figuur 1: Inundatiekaart Westerschelde op basis van lodingsgegevens 1990



Figuur 2: Inundatiekaart Westerschelde op basis van lodingsgegevens 1990, aangevuld op basis van lodingsgegevens uit 1992



Figuur 3: Inundatiekaart Westerschelde op basis van lodingsgegevens 1996



Figuur 4: Inundatiekaart Westerschelde op basis van lodingsgegevens 2001

In deze algoritmen is er steeds rekening mee gehouden dat het grid dat de Westerschelde representeert, beschreven wordt door een matrix met 834 rijen (noord-zuid richting) en 2414 kolommen (west-oost richting).

4.1 De scriptfile 'afstanden.m'

In dit script worden eerst de lodingsgegevens van een bepaald jaar ingelezen. Deze gegevens bestaan uit een 834×2414 matrix, waarbij ieder element de loding voorstelt in het met de matrixindices corresponderende meetpunt. Bovendien wordt een file 'locaties' ingelezen, waarin de locatie van de waterstandmeetstations is gespecificeerd ten opzichte van het gebruike grid. Het script berekent zes 834×2414 matrices met afstanden tot meetstations. Behalve de vier eerder genoemde meetstations zijn dit de stations Westkapelle en Cadzand, beide aan de monding van de Westerschelde. Indien in een gridpunt lodingsgegevens beschikbaar zijn, dan is het corresponderende element in de afstandsmatrix de afstand van dat meetpunt tot het betreffende waterstandmeetstation, gemeten langs de stroomrichting van de Westerschelde. Indien het meetpunt ten westen van het waterstandmeetstation ligt, wordt voor deze afstand een minteken geplaatst. Indien het meetpunt ten oosten van het waterstandmeetstation ligt, is het teken positief.

Programmatekst (voor het jaar 1990)

```
load locaties

load diepte1990
Atot = diepte;

%
[ii,jj]=size(Atot);

q=1:ii;
for j=1:jj,
    p=~isnan(Atot(:,j));
    v(j)=mean(q(p));
end

p=1:jj;
xx=polyfit(p(~isnan(v)),v(~isnan(v)),22);
w=polyval(xx,1:jj);

dist(1)=0;
for j=2:jj,
    dist(j)=dist(j-1)+20*sqrt(1+(w(j)-w(j-1))^2);
end

for i=1:834,
    tic
    for j=1:2414,
```

```
        if ~isnan(Atot(i,j)),
            [a,t]=min(((1:jj)-j).^2  + (w-i).^2 );
            pech(i,j)=dist(t);
        else
            pech(i,j)=NaN;
        end
    end
    i
    toc
end
save pechfile1990 pech
%load pechfile

% Bath

xloc=x(13);
yloc=y(13);

Ai= round((370990+20*ii-yloc)/20);
Aj= round((xloc-28210)/20);

[a,t]=min(((1:jj)-Aj).^2  + (w-Ai).^2 );

distbath=pech-dist(t);

save afstbath1990 distbath

% Cadzand

xloc=x(3);
yloc=y(3);

Ai= round((370990+20*ii-yloc)/20);
Aj= round((xloc-28210)/20);

[a,t]=min(((1:jj)-Aj).^2  + (w-Ai).^2 );

distcadzand=pech-dist(t);

save afstcadzand1990 distcadzand

% Hansweert

xloc=x(8);
yloc=y(8);

Ai= round((370990+20*ii-yloc)/20);
Aj= round((xloc-28210)/20);
```

```
[a,t]=min(((1:jj)-Aj).^2  + (w-Ai).^2 );

disthansweert=pech-dist(t);

save afsthansweert1990 disthansweert

% Terneuzen

xloc=x(7);
yloc=y(7);

Ai= round((370990+20*ii-yloc)/20);
Aj= round((xloc-28210)/20);

[a,t]=min(((1:jj)-Aj).^2  + (w-Ai).^2 );

distterneuzen=pech-dist(t);

save afstterneuzen1990 distterneuzen

% Vlissingen

xloc=x(5);
yloc=y(5);

Ai= round((370990+20*ii-yloc)/20);
Aj= round((xloc-28210)/20);

[a,t]=min(((1:jj)-Aj).^2  + (w-Ai).^2 );

distvlissingen=pech-dist(t);

save afstvlissingen1990 distvlissingen

% Westkapelle

xloc=x(2);
yloc=y(2);

Ai= round((370990+20*ii-yloc)/20);
Aj= round((xloc-28210)/20);

[a,t]=min(((1:jj)-Aj).^2  + (w-Ai).^2 );

distwestkapelle=pech-dist(t);

save afstwestkapelle1990 distwestkapelle
```

4.2 De functie 'gebiedlambda2.m'

Deze functie heeft als ingangsvariabelen vijf 834×2414 matrices, namelijk de lodingsgegevens van een jaar, alsmede afstandsmatrices t.o.v. Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath. De uitgangsvariabele is een gestructureerde variabele `A`. Het veld `A.gebied` bevat een 834×2414 matrix, met daarin de getallen $0, 1, 2, 3, 4, 5$. De waarde 0 geeft aan dat in het betreffende gridpunt geen dieptemeting is uitgevoerd. De overige waarden vormen een indeling in vijf gebieden zoals beschreven in Paragraaf 2. Het veld `A.lambda` bevat een 834×2414 matrix met de waarden van de variabele λ, eveneens geïntroduceerd in Paragraaf 2. In een gridpunt in gebied 0 is $\lambda = 0$, in gebied 1 en gebied 5 is $\lambda = 1$, en in de gebieden 2, 3, en 4 is λ een getal uit het interval $[0, 1]$, en loopt monotoon op van 0 naar 1 bij het doorlopen van het corresponderende gebied van west naar oost.

Programmatekst

```
function A = gebiedlambda2(diepte,afstVl,afstTn,afstHw,afstBt)

% Betekenis van de variabelen:
% Diepte: matrix met dieptemetingen
% afstVl: matrix met afstand tot Vlissingen langs stroomrichting
% afstTn: matrix met afstand tot Terneuzen langs stroomrichting
% afstHw: matrix met afstand tot Hansweert langs stroomrichting
% afstBt: matrix met afstand tot Bath langs stroomrichting
%
% De functie gebiedlambda2 berekent een gestructureerde variabele
% A met twee velden. Het veld A.gebied kan de waarden 0 t/m 5
% aannemen. Deze waarde codeert de locatie van het corresponderende
% punt:
%       0: buiten Westerschelde
%       1: ten oosten van Bath
%       2: tussen Hansweert en Bath
%       3: tussen Terneuzen en Hansweert
%       4: tussen Vlissingen en Terneuzen
%       5: ten westen van Vlissingen
%
% Het veld A.lambda geeft een getal op het interval [0,1] en geeft
% de verhouding weer van de afstand tussen begin- en eindpunt
% van het gebied. In het meest westelijke punt is deze waarde gelijk
% aan 0, in het meest oostelijke deel van het gebied gelijk aan 1.
% Een uitzondering hierop vormen gebieden 0 en 1 en 5. Voor gebied 0 is
% overal lambda = 0, en voor gebied 1 en 5 is overal lambda = 1.

A.gebied = zeros(834,2414);

A.gebied = (A.gebied + (afstBt >= 0) + 2*((afstBt<0) & (afstHw>=0)) + ...
    3*((afstHw<0) & (afstTn>=0)) + 4*((afstTn<0) & (afstVl>=0)) + ...
    5*((afstVl<0))).*(1-isnan(diepte));
```

```
A.lambda = zeros(834,2414);

A.lambda = A.lambda + (A.gebied==1) + ...
    (A.gebied==2).*(afstHw./(afstHw-afstBt)) + ...
    (A.gebied==3).*(afstTn./(afstTn-afstHw)) + ...
    (A.gebied==4).*(afstVl./(afstVl-afstTn)) + (A.gebied==5);
```

4.3 De functie 'inundatie31.m'

Deze functie heeft als ingangsvariabelen de gestructureerde variabele `A` (uitvoer van 'gebiedlambda2.m'), de 834×2414 matrix van dieptemetingen, de waterstandtijdreeksen van de meetstations Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath, met metingen gedurende een kalenderjaar met een meetfrequentie eens per 10 minuten, reistijden (in minuten) voor de getijdegolf op de trajecten Vlissingen-Terneuzen, Terneuzen-Hansweert, en Hansweert-Bath, en tenslotte de meetperiode (in minuten; in dit geval steeds gelijk aan 10). De uitvoer is de 834×2414 matrix `percentage`, met daarin de fractie van de tijd dat het corresponderende gridpunt onder water staat. Om de droogvalfracties te berekenen, zoals afgebeeld in de inundatiekaarten in Figuren 1, 2, 3, 4, volstaat tenslotte het commando `1 - percentage`. In gridpunten waarvan geen dieptemeting beschikbaar is, is de corresponderende waarde van `percentage` gelijk aan `NaN`, de Matlab-representatie van 'Not a Number'.

Programmatekst

```
function percentage = inundatie31(A,diepte,trVl,trTn,trHw,trBt,
                                  VlTn,TnHw,HwBt,meetperiode)

% Betekenis van de variabelen:
%
% Diepte: matrix met dieptemetingen
%
% A: Uitvoervariabele van de functie gebiedlambda2
%
% trVl: gemeten tijdreeks van waterstanden in Vlissingen
% trTn: gemeten tijdreeks van waterstanden in Terneuzen
% trHw: gemeten tijdreeks van waterstanden in Hansweert
% trBt: gemeten tijdreeks van waterstanden in Bath
%
% VlTn: reistijd Vlissingen Terneuzen in minuten
% TnHw: reistijd Terneuzen Hansweert in minuten
% HwBt: reistijd Hansweert Bath in minuten
% meetperiode: tijd tussen twee waterstandmetingen in minuten
%
% inundatie31 berekent voor elk punt in een 834 bij 2414 matrix
% het percentage van de tijd dat de waterstand hoger is dan de
% diepte, d.w.z. in welk percentage van de metingen het meetpunt
% onder water staat. Indien in een punt geen dieptemeting voor
% handen is, wordt het bijbehorende percentage NaN.
```

```
[Hwwest,Btoost]=verschuiving(trHw,trBt,HwBt,meetperiode);
[Tnwest,Hwoost]=verschuiving(trTn,trHw,TnHw,meetperiode);
[Vlwest,Tnoost]=verschuiving(trVl,trTn,VlTn,meetperiode);

for n=1:834
   for m=1:2414
       if isnan(diepte(n,m))
            percentage(n,m) = NaN;
        elseif A.gebied(n,m)==1
            percentage(n,m) = percentagebepaling(trBt,diepte(n,m));
        elseif A.gebied(n,m)==2
            percentage(n,m)=tijdreeksconstructie1(Hwwest,Btoost,...
                                        A.lambda(n,m),diepte(n,m));
        elseif A.gebied(n,m)==3
            percentage(n,m)=tijdreeksconstructie1(Tnwest,Hwoost,...
                                        A.lambda(n,m),diepte(n,m));
        elseif A.gebied(n,m)==4
            percentage(n,m)=tijdreeksconstructie1(Vlwest,Tnoost,...
                                        A.lambda(n,m),diepte(n,m));
        elseif A.gebied(n,m)==5
            percentage(n,m) = percentagebepaling(trVl,diepte(n,m));
        end
    end
end


function [trwestnieuw,troostnieuw]=verschuiving(trwest,troost,reistijd,...
                                                meetperiode)

alpha0 = floor(reistijd/meetperiode);
alpha1 = ceil(reistijd/meetperiode);
lambda0 = (reistijd/meetperiode)-alpha0;
lwest = length(trwest);

if alpha0==alpha1,
   trwestnieuw = trwest(alpha0+1:lwest);
   troostnieuw = troost(1:lwest-alpha0);
else
   for k=1:alpha0, hulp(k) = NaN; end;
   reeks1 = [hulp';troost;NaN];
   reeks2 = [hulp';NaN;troost];
   oostverschoven = (1-lambda0)*reeks1 + lambda0*reeks2;
   trwestnieuw = trwest(alpha0+2:lwest);
   troostnieuw = oostverschoven(alpha0+2:lwest);
end
```

```
function percentage = percentagebepaling(waterstand,diepte)

% Gegeven een tijdreeks waterstand, en een gegeven diepte,
% wordt bepaald in welk percentage van de metingen de
% waterstand hoger is dan de diepte, d.w.z. in welk
% percentage van de metingen het meetpunt onder water staat

percentage = sum(waterstand>diepte)/length(waterstand);



function percentage = tijdreeksconstructie1(trwest,troost,lambda,diepte);

% Gegeven twee tijdreeksen trwest en troost, en een getal
% lambda tussen 0 en 1, dan bepaalt tijdreeksconstructie
% eerst een nieuwe reeks als convexe combinatie van de
% twee oude reeksen:
%   trnieuw = (1-lambda)*trwest + lambda*troost
% Vervolgens wordt bepaald in welk percentage van de gevallen
% de waterstand hoger is dan de diepte, d.w.z. in welk percentage
% van de gevallen het gegeven punt onder water staat.

waterstand = (1-lambda)*trwest + lambda*troost;
percentage = sum(waterstand>diepte)/length(waterstand);
```