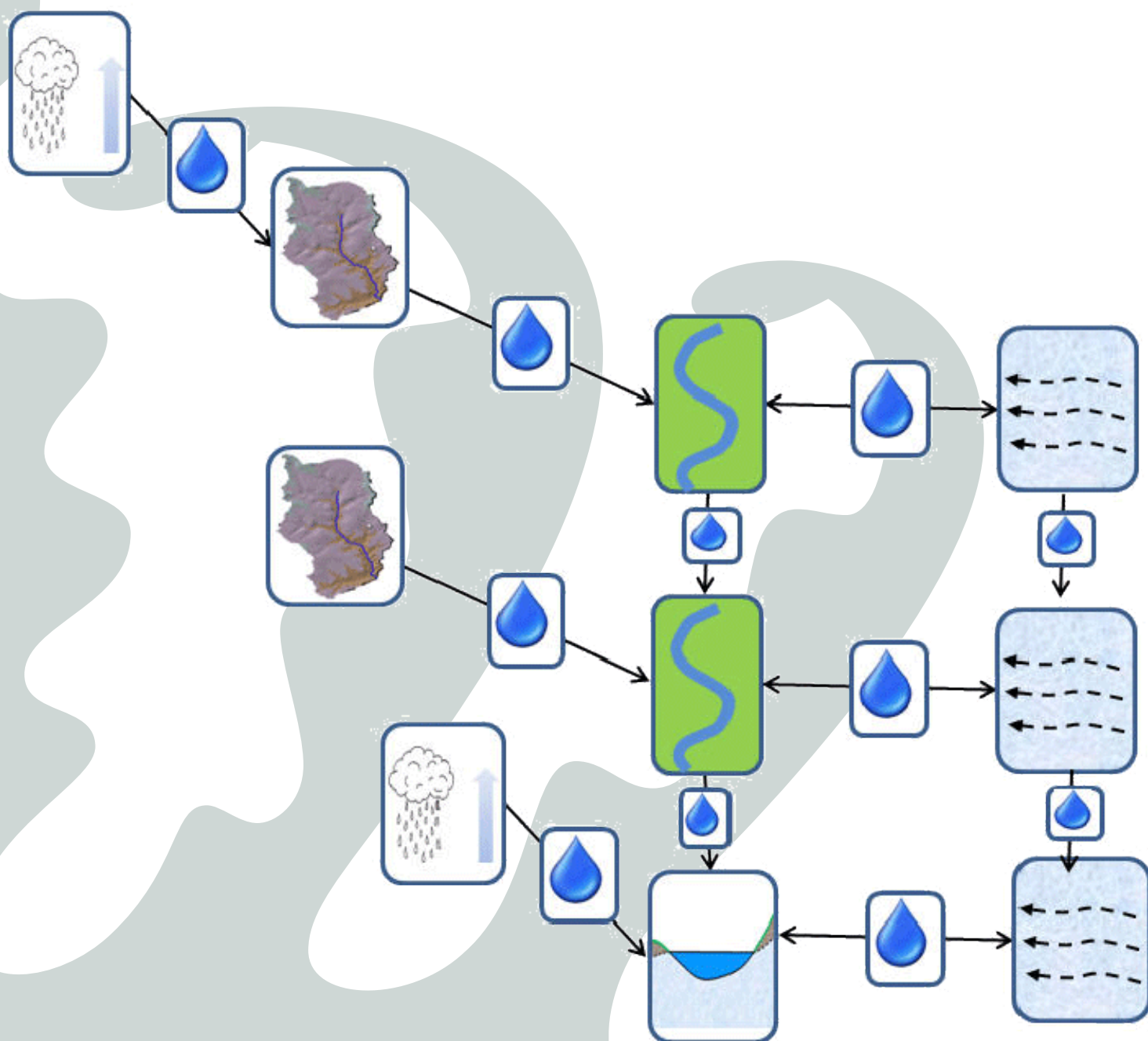




Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Kolofon

Titel:

Sømod. IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Emneord:

Model, sø-restaurering, grundvandsudveksling.

Udgiver:

Naturstyrelsen

Ansvarlig institution:

Naturstyrelsen

Forfattere:

Jacob Gudbjerg og Jan Gregersen, HydroInform

Sprog:

Dansk

År:

2011

URL:

www.nst.dk

ISBN nr. elektronisk version:

978-87-92708-30-4 (PDF)

Udgiverkategori:

Statslig

Resume:

Som et bidrag til en mere effektiv miljøforvaltning er der udviklet model værktøjer til modellering af søer og vandløb.

Disse er udviklet med særlig fokus på bestemmelse af grundvandsudvekslingen og udnyttelse af forskelligartede målinger, herunder naturlige sporstoffer.

Må citeres med kildeangivelse.

Ansvarsfraskrivelse:

Naturstyrelsen offentliggør rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Naturstyrelsen finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Naturstyrelsen deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne.

Indhold

Baggrund	10
Søer	10
Modellering.....	10
Vandbalance og grundvandsudveksling.....	10
HydroNet modellen	11
HydroNet modellen	12
Konceptuel model for vand.....	13
Konceptuel model for søer.....	13
Konceptuel model for vandløbsstrækninger	14
Algoritme.....	17
Specialtilfælde	19
Flere opstrøms forbindelser.....	19
Kobling til grundvandet.....	20
Nedbør og fordampning	21
Transport	21
Reaktiv transport	21
IT-arkitektur og API	22
Brugerflade	25
OpenMI tilpasning af HydroNet modellen	26
Nedbør-afstrømningsmodul - HydroCat	28
HydroCat konceptet.....	28
Anvendelse af HydroCat modellen.....	32
Tidsserier:.....	32
Parameter:.....	32
Brugerflade	33
Værktøj til håndtering af tidsserier	36
Tidsserier.....	36
Tidspunkt og tidsperiode baserede tidsserier	36
Enheder og dimensioner.....	36
Interpolation og ekstrapolation	37
Tidsserie fil format	37
Programkoden.....	38
Eksempler på anvendelser af tidsseriemodulet.....	40
Test	40
Visualisering af tidsserier	41
Tidsserie editor	41
Model anvendelser, test og evaluering	43
Modellering af opkoncentration ved fordampning.....	43
Vedsted sø	45
Målinger	45
Model.....	47
Modelkørsler med linkede modeller	51
Anvendelse af projektets resultater	57
IT-portal.....	57
Referencer	59

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Forord

Nærværende rapport er den afsluttende rapport for projektet ”IT-System til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret dataanalyse og modellering”. Projektet kaldes i det følgende for Sømod projektet.

Sømod projektet er delvist finansieret af By- og Landskabsstyrelsen (nu: Naturstyrelsen) under puljen ”Tilskudsordning til miljøeffektive teknologi”.

Projektet er udført af HydroInform med Jacob Gudbjerg som underkonsulent.

Der har til projektet været tilknyttet en følgegruppe bestående af:

Ivan B. Karottki, By- og Landskabsstyrelsen (formand for følgegruppen)

Thomas Hansen, By- og Landskabsstyrelsen

Martin Søndergaard, Danmarks Miljøundersøgelser (DMU)

Peter Engesgaard, Geologisk Institut, Københavns Universitet

Jens Rasmussen, Københavns Energi

Torben Sonnenborg, GEUS

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Sammenfatning og konklusioner

I Sømod projektet er der udviklet modelværktøjer, som kan bidrage til en mere effektiv forvaltning og restaurering af søer og vandløb. Modellerne er generelt anvendelige inden for sø og vandløbshydrologi og kan anvendes til at give et kvantitativt estimat på hydrologiske og miljømæssige ændringer som konsekvens af menneskeskabte eller naturlige påvirkninger.

Modelværktøjerne er udviklet med særlig fokus på bestemmelse af udvekslingen mellem overfladevand og grundvand. Denne udveksling udgør typisk en betydelig del af den overordnede vandbalance og er dermed vigtig.

Kernen i de udviklede modelværktøjer er HydroNet modellen. HydroNet er en konceptuel model for vandtransport, stoftransport og stofomsætning i søer og vandløb.

I forbindelse med undersøgelser af udveksling mellem overfladevand og grundvand foretages en lang række forskelligartede målinger som f.eks. grundvandspotentialer, seepagemeter målinger i søbunde, målinger af ilt-isotop, klorid, og radonkoncentrationer og temperaturmålinger. Sådanne målinger giver en kvalitativ indikation af grundvandsudvekslingen. For at udnytte sådanne målinger til en kvantitativ bestemmelse af grundvandsudvekslingen må disse ses i sammenhæng med systemets tidsvarierende strømning og vandbalance, hvilket nødvendiggør anvendelse af numeriske modeller.

Eksisterende modeller er imidlertid ikke i stand til at håndtere de meget forskelligartede målinger. Derfor er HydroNet modellen udviklet efter et nyt numerisk princip, hvor vand og stof transporteres i såkaldte numeriske vandpakker gennem et netværk af søer og vandløb. Vandpakkerne tildeles egenskaber og funktionalitet, som den pågældende vandtype har. Afkoblingen af vandets egenskaber fra det fysiske miljø, som vandet befinder sig i (f.eks. sø eller vandløb), har gjort det muligt effektivt at inddrage processer og egenskaber svarende til tidligere nævnte målemetoder i modellen. Det anvendte princip gør det også muligt let at tilpasse modellen til at håndtere nye målemetoder. Vand og stoffer udveksles med grundvandet via randbetingelser baseret på Darcy's lov.

For at kunne inddrage tilstrømning fra søernes og vandløbenes hydrologiske opland er der implementeret en simpel lumped konceptuel nedbør-afstrømningsmodel (HydroCat). HydroCat simulerer den tidsvarierende tilstrømning ud fra tidsserier for nedbør, temperatur og potentiel fordampning. HydroCat kan dermed generere randbetingelser for tilstrømning til HydroNet modellen.

Håndtering af tidsserier er besværligt og tidskrævende. For at effektivisere dette er der udviklet en generisk tidsseriekomponent. Komponentens objektklasser anvendes internt i modellerne, men disse kan også anvendes separat via programkode eller via tidsseriekomponentens brugerflade. Tidsseriekomponenten håndterer både tidsserier, hvor værdierne er knyttet til tidspunkter eller hvor værdierne er knyttet til tidsperioder. Konverteringer mellem forskellige tidslige opløsninger håndteres

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

automatisk via metoder for interpolering, ekstrapolering og aggregering. Endelig kan enheder automatisk konverteres.

Alt den udviklede software er kodet i stærkt struktureret objektorienteret C# og er open source. Softwareudviklere kan således lave tilpasninger eller udnytte enkeltdele både til rådgivningsopgaver, forskning eller kommercielle udviklinger.

Det kan være hensigtsmæssigt at anvende modelværktøjerne i sammenhæng med andre modeller. Derfor er HydroNet og tidsseriekomponentet gjort kompatibel til OpenMI standarden. Dette gør det muligt at koble disse dynamisk til andre OpenMI kompatible modeller, som f.eks. Mike modellerne fra DHI.

Der er i projektet lavet en række testkørsler med historiske og hypotetiske data, både med enkeltkomponenter og koblede systemer.

Yderligere er der udviklet brugerflader, som egner sig til specifikke anvendelser. Test af beregningskerner og brugerflader viser, at systemerne er både praktisk anvendelige og effektive.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Summary

In this project modelling tools, which can contribute to more efficient management and rehabilitation of lakes and streams, have been developed. The models are generally applicable within the domain of surface water hydrology and can be used to provide a quantitative estimate of the hydrological and environmental changes due to human or natural impacts.

The modelling tools are developed with focus on determination of groundwater-surface water interactions. This exchange typically represents a significant part of the overall water balance, which makes it important.

The core of the developed modelling tools is the HydroNet model. HydroNet is a conceptual model for water transport, solute transport and decomposition of solutes in lakes and streams.

In connection to surveys of groundwater-surface water interactions a number of very different types of measurements, such as seepagemeter measurements at the lakebed, measurements of oxygen isotope, chloride and radon concentrations and temperature measurements, may be performed. Such measurements give a qualitative indication of the groundwater-surface water exchange. However, in order to use these measurements for a quantitative determination of the groundwater-surface water interaction, such measurements must be seen in the context of the overall time varying water balance, which makes the use of numerical models necessary.

However, existing models cannot handle the diverse types of measurement. In order to deal with this problem, the HydroNet model was developed based on a new numerical principle, where water and solutes are transported in so called water packages through a network of lakes and streams. The water packages are assigned properties and functionalities according to the specific type of water currently used in the system. Decoupling of the water properties from the physical environment in which the water resides (e.g. lake or stream), has made it possible, in an efficient way, to include processes and properties corresponding to the earlier mentioned types of measurements. The applied numerical principle also makes it easy to adapt the model to new measurement methods. The groundwater-surface water interactions are handled by boundary conditions based on the Darcy equation.

In order to include discharge/inflow from the catchments surrounding the lakes and streams, a simple lumped conceptual rainfall-runoff model (HydroCat) was implemented. HydroCat simulates the time varying discharge based on timeseries of precipitation, temperature and potential evaporation. Hence, the HydroCat model can generate boundary conditions for inflow to the HydroNet model.

Handling of timeseries is both cumbersome and time consuming. In order to make this more efficient a generic timeseries component was developed. The timeseries

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

component object classes are used in the implementation of the models, but these can also be used separately in programming code or via the user interface of the timeseries component. The time series component handles both timeseries where values are associated to time stamps and where the values are associated with time spans. Conversion between timeseries with different temporal resolutions is handled automatically through methods for interpolation, extrapolation and aggregation. Conversion between different units is also handled by the time series component.

All the software developed within this project is highly structured object oriented C# and open source. Hence, software developers can make changes or use individual parts for both consulting projects, research and for commercial software development.

It may be desirable to use the modelling tools in connection with other models. Hence, the HydroNet and the timeseries component were made compliant with the OpenMI standard. This makes it possible to dynamically link these models to other OpenMI compliant models, such as the Mike models from DHI.

A number of test runs with hypothetical and historic data for both individual components and linked systems were carried out. Moreover, user interfaces for specific applications were developed. The tests of the calculation engines and the user interfaces showed that the systems are both practically applicable and efficient.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Baggrund

Søer

En sø er et meget komplekst og sammensat system. De hydrauliske og hydrologiske forhold, så som tilstrømning, afstrømning, udveksling med det underliggende grundvand, interne strømninger og fordampning/evapotranspiration kan være komplekse nok i sig selv at håndtere. Men dette kompliceres yderligere af, at disse processer også afhænger af de biologiske og kemiske processer i søen. Evapotranspiration fra søens planter afhænger af planternes vækst, som igen afhænger af søens næringsforhold, som påvirkes af sammensætningen af fisk i søen. Der er altså tale om et meget komplekst system, hvor næsten alt afhænger af alt. Når man i forbindelse med sø-restaurering ønsker at forbedre en søs tilstand, må dette ske gennem specifikke indgreb – man må ændre på et eller andet for at skabe den forbedrede situation. Man kan opfiske specifikke fiskearter, som anses for u hensigtsmæssige for søen, man kan hælde aluminium i søen for at binde fosfat, man kan regulere arealanvendelserne i søens opland for at mindske tilstrømningen af nitrat eller noget helt andet. Generelt set er det meget vanskeligt at forudsige både kortsigtede og langsigtede effekter af sådanne tiltag. Derfor vil man opleve, at mange tiltag kun har ringe eller ingen eller virkning på søens tilstand.

Modellering

Et kvantitativt mål for effekten af et specifikt tiltag kan opnås ved hjælp af numerisk modellering. Alle processer – hydrologiske, hydrauliske, kemiske, biologiske og meteorologiske, som anses for vigtige, beskrives ved matematiske ligninger og omformes vha. numerisk analyse til programmerbare algoritmer, der kan implementeres i modellen. Modellen kalibreres mod målte værdier, indtil man har et system, som med tilstrækkelig nøjagtighed opfører sig som søen. Man kan så efterfølgende afvikle en række simuleringer og se effekten af det specifikke tiltag. Let og ligetil? Nej, bestemt ikke. Den ultimative sø-model, der kan simulere enhver sø, findes ikke, og hvis den gjorde, ville den være så kompliceret at bruge, at den ikke ville være praktisk anvendelig. Yderligere afhænger kvaliteten af simulerede værdier fuldstændigt af det datagrundlag, som man har anvendt til at kalibrere sin model med. Så hvis man kun har et ringe datagrundlag, vil en avanceret model ikke kunne give nøjagtige resultater. Generelt set kan man betragte en model som et redskab til at interpolere og ekstrapolere målte data i tid og sted. En god model, som beskriver de fysiske processer godt, og som er kalibreret på et godt datagrundlag, vil kunne bruges til at give gode konsekvensberegninger for større tiltag på lang sigt, mens en dårlig model blot kan sige noget om ændringerne i søens tilstand på kort sigt for mindre tiltag.

Vandbalance og grundvandsudveksling

Enhver god sø-model, uanset hvor kompleks den måtte være, skal kunne modellere den overordnede vandbalance for søen med god præcision, fordi efterfølgende modellering af transport og omsætning af stoffer baseres på det vand, der transporteres med. En unøjagtig beregning af vandtransporten kan dermed resultere i en endnu større fejl i stofberegningerne. For vandbalancen i en sø handler det om at have

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

styr på indstrømning, udstrømning, nedbør, fordampning og udveksling med grundvand, samt ændringer i søens volumen. Blandt disse bidrag er det udvekslingen med grundvand og fordampning, som er sværest at vurdere, idet der ikke er nogen direkte metoder til at måle disse. Man kan vha. potentiale målinger eller seepagemålinger sige noget om grundvandsinteraktionen, men et nøjagtigt kvantitativt mål er vanskeligt at få, da disse målinger er punktmålinger, som ofte ikke vil repræsentere søen som helhed. En anden og mere lovende tilgang vil være at udnytte naturlige sporstoffer i grundvandet (Gleeson et. al. 2009). Stoffer som radon, klorid, isotoper af ilt optræder i forskellige koncentrationer i grundvand og overfladevand. Målinger af koncentrationer af disse stoffer kombineret med en massebalancemodel for vand og stof i søen vil kunne give information om udvekslingen af søvand med grundvand. Herefter kan den sidste ubekendte - fordampningen - beregnes ud fra en almindelig massebalanceberegning.

HydroNet modellen

I projektet er der udviklet en model, som kan bidrage til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand for søer og vandløb vha. integreret dataanalyse og modellering. Vi kalder modellen HydroNet.

Som tidligere nævnt er det hverken hensigtsmæssigt eller muligt at udvikle den ultimative model, som kan tage alle de hydrauliske, hydrologiske og biokemiske processer i regning. I dag anvendes typisk helt simple ikke-koblede modeller (vandbalance for en sø) eller meget komplicerede integrerede modeller (Mike She / Mike 11), som ikke er specifikt udviklet til interaktion mellem sø og grundvand. HydroNet modellen lægger sig mellem disse yderpunkter.

HydroNet modellen er en konceptuel model, som er designet til at udnytte information om koncentrationer af naturlige grundvandssporstoffer til at modellere vandbalancen for søen og dermed også udvekslingen mellem overfladevand og grundvand.

HydroNet modellen vil bl.a. kunne anvendes / udnyttes til følgende ting:

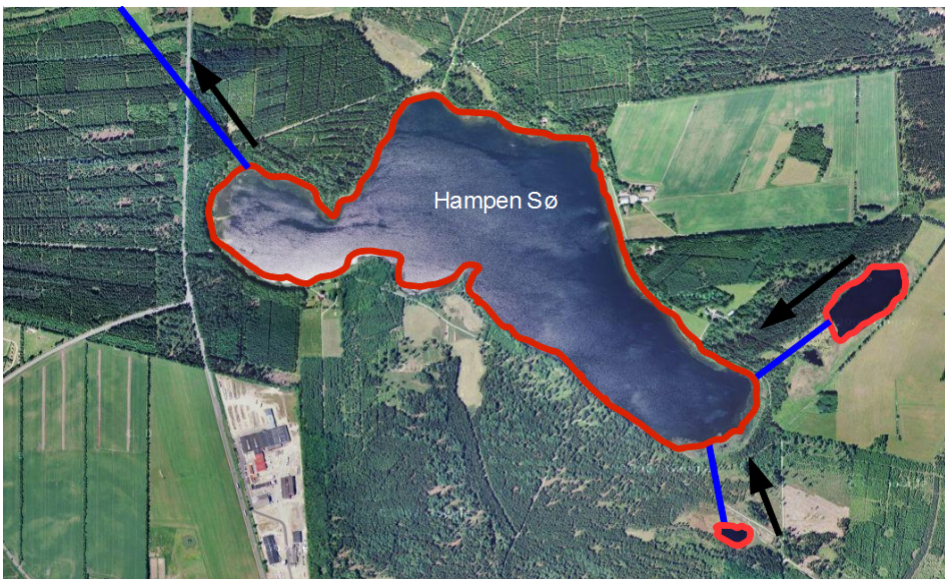
- Beregning / modellering af udvekslingen mellem grundvand og overfladevand for søer og vandløb
- Planlægning af optimal strategi for målinger. Altså, hvor får man mest gavn af at lave målinger, og hvad er det mest hensigtsmæssigt at måle. Det vil specielt være relevant før man tager en ny, ukendt målemetode i anvendelse.
- Konsekvensberegning af specifikke sørestaureringstiltag.
- Hypotesetestning. F.eks. hvis man ønsker at teste en hypotese om en specifik biokemiske proces, kan denne programmeres til et modul i systemet og indgå sammen med øvrige modeller.
- Anvendes til videreudvikling eller som byggesten i forbindelse med forskningsprojekter. Alt den udviklede software er open source og dermed direkte tilgængelig.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

HydroNet modellen

En HydroNet model består af vandløb og søer forbundet i et netværk med tilknyttede randbetingelser såsom nedbør, fordampning, udveksling med grundvand, direkte tilledning etc. Vandet rutes fra den opstrøms del til den nedstrøms del i diskrete tidskridt. Rutningen fra en sø eller et vandløb beregnes i diskrete tidskridt ved at summere alle kildeled, fratrykke alle tabsled og derefter sende overskuddet videre til nedstrøms forbindelser.



Figur 1 Illustration af HydroNet-model for Hampen Sø. De røde polygoner er søer, som er forbundet af blå vandløbsstrækninger. De sorte pile angiver strømningens retning.

I søer antages der fuld opblanding af det indstrømmende vand hen over et tidskridt, mens vandet i vandløb skubbes igennem en strækning i isolerede pakker, som udveksler med omgivelserne (eks. grundvand), men som ikke blandes indbyrdes. Som udgangspunkt foretages en simpel rutning af overskydende vand, idet magasineringen i søer og vandløb holdes konstant. Søer og vandløb betegnes vandelementer.

HydroNets stærke side er at vurdere opblandingen af forskellige vandtyper. Med vandtyper menes vand som har et distinkt signal (stofkoncentration, temperatur, farve etc.). Eksempelvis vil nedbør typisk indeholde lave koncentrationer af opløste stoffer, mens grundvand har højere koncentrationer. Hvis man så har en måling fra en sø vil man kunne udlede, hvor stor en del af søens vand, der kommer som direkte nedbør og hvor stor en del der kommer via grundvandet.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Konceptuel model for vand

En af de specielle ting for HydroNet-modellen er, at vand modelleres som et objekt. Et vand-objekt har de egenskaber og kan gøre de ting, som en afgrænset mængde vand har i virkeligheden. For eksempel:

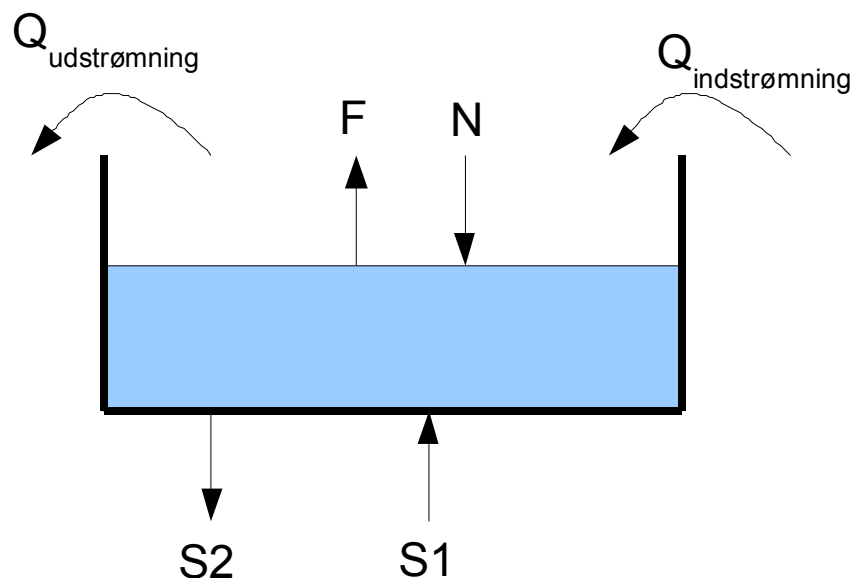
- Vand kan fordampe. En del af massen forsvinder, mens opløste kemiske stoffer ikke forsvinder men opkoncentreres.
- Der kan iblandes nyt vand, hvorved koncentrationerne ændres.
- Der kan fjernes vand.
- Der kan tilføjes vandopløselige stoffer.
- Der kan tilføjes energi, hvorved temperaturen stiger.
- Vandet kan "bevæges" i tid, hvorved eventuelle kemiske reaktioner kan foregå.

Den måde at opbygge modellen på betyder, at modellen er tættere på virkeligheden og dermed mere fysisk baseret. Det betyder, at der ikke bliver kunstige barrierer for, hvilke nye fysiske situationer modellen i fremtiden vil kunne håndtere.

Endvidere er modellen blevet nemmere at opdatere og vedligeholde, idet den ligner den fysiske verden, og derfor er nemmere at forstå.

Konceptuel model for søer

En sø modelleres som et simpelt reservoir, hvor alt indstrømmende vand blandes. Efterfølgende beregnes vandoverskuddet, og det rutes videre til nedstrøms forbindelser. Figur 2 viser et skematisk billede af, hvordan en sø opfattes i modellen.



Figur 2 Konceptuel model for søer.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Der opstilles følgende vandbalance for søen, så udstrømningen kan beregnes:

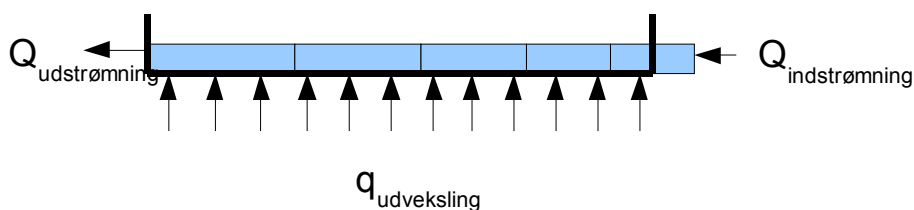
$$Q_{\text{udstrømning}} = Q_{\text{indstrømning}} + N - F + S - \Delta V \quad (1)$$

hvor N er nedbør, F er fordampning, S er et kildeled, som kan være negativt eller positivt og ΔV er ændringen i magasinering. Der er ingen begrænsninger på hvor mange forskellige bidrag der kan være til søens vandbalance. Eksempelvis vil det være relevant at koble forskellige kildeled på, hvis potentialet i grundvandet ikke kan forventes at være konstant under hele søen.

Konceptuel model for vandløbsstrækninger

En vandløbsstrækning er karakteriseret ved, at der kun er forbindelse til andre vandløbsstrækninger i opstrøms eller nedstrøms ende. Der kan altså ikke være et tilløb fra en sidegren midt på vandløbsstrækningen. Endvidere skal udvekslingen med grundvand, fordampning og direkte tilledning eller oppumpning være jævnt fordelt hen over vandløbsstrækningen. Ønskes det eksempelvis at beskrive forskellig udveksling med grundvand i opstrøms og nedstrøms ende, skal strækningen brydes op i to vandløbsstrækninger.

I modsætning til en sø sker der ikke en total opblanding af vandet i en vandløbsstrækning. I stedet ledes det indstrømmende vand igennem strækningen i diskrete vandpakker. Den metode er valgt, fordi man så kan benytte en større diskretisering ved stoftransport uden at få problemer med numerisk dispersion. Vandpakkerne vil på deres vej gennem vandløbsstrækningen udveksle med grundvand, atmosfære og eventuelle direkte tilledninger. Det er illustreret figur 3.



Figur 3 Illustration af vandpakker der bevæger sig gennem en vandløbsstrækning.

Udvekslingen med randbetingelserne betyder, at volumenet ændrer sig. Når volumenet ændrer sig ændres også arealet, hvorover udvekslingen sker. Her forudsættes det, at vanddybden ikke ændres, således at en ændringen i volumen medfører, at vandpakken bliver længere. Figur 3 viser, hvordan vandpakkerne gradvist bliver længere efterhånden, som de bevæger sig ned igennem vandløbsstrækningen på grund af det indstrømmende grundvand. Påvirkningen af en vandpakke er altså ikke konstant ned igennem vandløbsstrækningen, og den skal derfor beskrives ved en differentialligning:

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

$$\frac{dV}{dt} = V \cdot q_{\text{udveksling}} \quad (2)$$

hvor V er volumenet, t er tiden og $q_{\text{udveksling}}$ er indstrømningen pr volumenenhed af vandløbet. Ligningen udtrykker, at hastigheden, hvormed volumenet ændrer sig, er lig med volumenet gange den udveksling, der sker pr. volumenenhed. Volumenet kan benyttes som udtryk for det areal over hvilket udvekslingen sker, fordi vanddybden og bredden af vandløbet forudsættes konstant. Differentialligningen har følgende løsning:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= V \cdot q_{\text{udveksling}} \\ &\Leftrightarrow \\ \frac{q_{\text{udveksling}} \int \square}{V} \cdot dV &= \int t \cdot dt \\ &\Leftrightarrow \\ q_{\text{udveksling}} \cdot \ln(V) &= t + c \\ &\Leftrightarrow \\ V &= c \cdot \exp(q_{\text{udveksling}} \cdot t) \end{aligned} \quad (3)$$

Indsættes begyndelsesbetingelsen $V = V_0$ for $t = 0$ fås:

$$V = V_0 \cdot \exp(q_{\text{udveksling}} \cdot t) \quad (4)$$

Ligningen udtrykker, hvordan volumenet af en given vandpakke vil ændre sig som funktion af tiden. Ligningen forudsætter, at hele vandpakken er i vandløbet.

For vandpakker på vej ind i vandløbsstrækningen skal der i stedet benyttes nedenstående ligning:

$$\frac{dV}{dt} = V \cdot q_{\text{udveksling}} + Q_{\text{indstrømning}} \Leftrightarrow \frac{\int \square}{q_{\text{udveksling}} \cdot V + Q_{\text{indstrømning}}} \cdot dV = \int t \cdot dt \Leftrightarrow \frac{1}{q_{\text{udveksling}}} \cdot \ln |q_{\text{udveksling}} \cdot V + Q_{\text{indstrømning}}| = t + c$$

Hvor $Q_{\text{strømning}}$ er indstrømningen i volumen pr. tid. Her er V volumenet i vandløbsstrækningen og ikke volumenet af vandpakken. Det volumen ændrer sig dels på grund af udvekslingen og dels på grund af, at der strømmer mere vand ind.

Ligning (Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.5) har to løsninger, alt efter om udtrykket $q_{\text{udveksling}} \cdot V + Q_{\text{indstrømning}}$ er positivt eller negativt. Udtrykket bliver kun negativt, hvis der fra den indstrømmende vandpakke tabes mere vand ved eksempelvis fordamning, end der strømmer ind. Det er ikke fysisk muligt, og vi behøver derfor kun betragte den ene løsning:

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

$$\begin{aligned}
 & \text{For } Q_{\text{udveksling}} \cdot V + Q_{\text{indstrømning}} > 0: \\
 & \Leftrightarrow \\
 & Q_{\text{udveksling}} \cdot V + Q_{\text{indstrømning}} = c \cdot \exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot t) \\
 & \Leftrightarrow \\
 & V = \frac{c \cdot \exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot t) - Q_{\text{indstrømning}}}{Q_{\text{udveksling}}}
 \end{aligned} \tag{6}$$

For vandpakker på vej ind i vandløbet gælder begyndelsesbetingelsen $V = 0$ for $t = 0$. Indsættes den i ligning (6) fås:

$$V = \frac{Q_{\text{indstrømning}} \cdot (\exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot t) - 1)}{Q_{\text{udveksling}}} \tag{7}$$

Tilsvarende kan der opstilles en ligning for vandpakker på vej ud af vandløbsstrækningen, hvor vi i stedet for indstrømningshastighed benytter udstrømningshastigheden givet ved:

$$Q_{\text{udstrømning}} = Q_{\text{indstrømning}} + Q_{\text{udveksling}} \cdot V_{\text{strækning}} \tag{8}$$

Udstrømningen bidrager negativt til volumenændringen, idet volumenet i vandløbsstrækningen bliver mindre efterhånden, som der strømmer mere ud:

$$\frac{dV}{dt} = V \cdot Q_{\text{udveksling}} - Q_{\text{udstrømning}} \Leftrightarrow \frac{dV}{Q_{\text{udveksling}} \cdot V - Q_{\text{udstrømning}}} = dt \Leftrightarrow \frac{1}{Q_{\text{udveksling}} \cdot V - Q_{\text{udstrømning}}} \cdot \ln |Q_{\text{udveksling}} \cdot V - Q_{\text{udstrømning}}| = t + c$$

Ligning (9) har igen to løsninger, men kun den, hvor udtrykket $Q_{\text{udveksling}} \cdot V - Q_{\text{udstrømning}}$ er mindre end 0 har en fysisk mening:

$$\begin{aligned}
 & \text{For } Q_{\text{udveksling}} \cdot V - Q_{\text{udstrømning}} < 0: \\
 & \Leftrightarrow \\
 & Q_{\text{udstrømning}} - Q_{\text{udveksling}} \cdot V = c \cdot \exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot t) \\
 & \Leftrightarrow \\
 & V = \frac{Q_{\text{udstrømning}} - c \cdot \exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot t)}{Q_{\text{udveksling}}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

For vandpakker på vej ud af vandløbsstrækningen gælder begyndelsesbetingelsen $V = V_0$ for $t = 0$. Indsættes den i ligning (10) fås:

$$\ln(V_0 \cdot Q_{\text{udveksling}} - Q_{\text{udstrømning}}) = c \cdot \exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot 0) \Leftrightarrow c = Q_{\text{udstrømning}} - V_0 \cdot Q_{\text{udveksling}} \Leftrightarrow V = \frac{Q_{\text{udstrømning}} - (Q_{\text{udstrømning}} - V_0 \cdot Q_{\text{udveksling}}) \cdot \exp(Q_{\text{udveksling}} \cdot t)}{Q_{\text{udveksling}}}$$

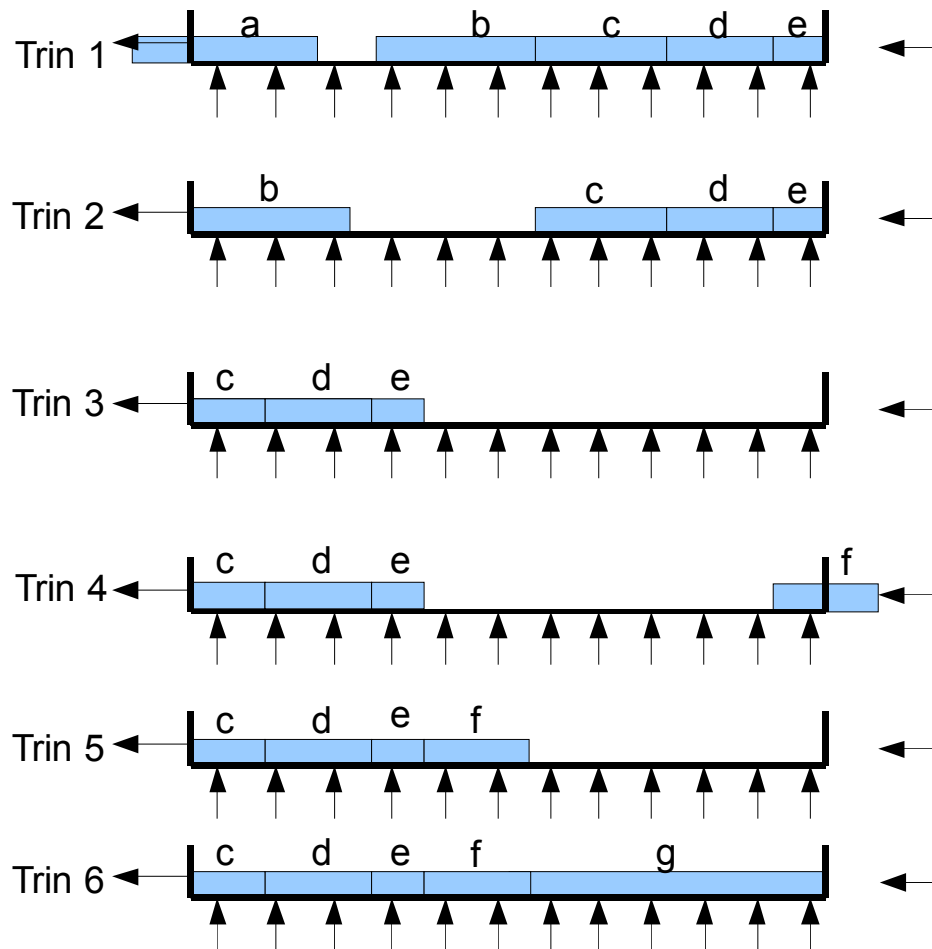
Vi har nu ligning (7), til at beskrive vandpakker, der bevæger sig ind i vandløbet, ligning (4) til at beskrive pakker, der opholder sig i vandløbsstrækningen og ligning (11), der beskriver pakker på vej ud af vandløbet. Med disse tre ligninger kan vi derfor fordele påvirkningen fra randbetingelserne på de vandpakker, der måtte strømme i vandløbsstrækningen.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Algoritme

I første omgang bestemmes $Q_{\text{indstrømning}}$, $Q_{\text{udstrømning}}$ og $Q_{\text{udveksling}}$ ved at opsummere alle randbetingelser og se om indstrømningen overstiger magasineringen, så overskuddet skal rutes videre til nedstrøms forbindelser. Herefter flyttes de enkelte vandpakker igennem vandløbsstrækningen, og det beregnes, hvor meget der udveksles, og hvor lang tid de opholder sig i vandløbsstrækningen. Måden vandpakkerne flyttes på er illustreret i nedenstående figur.



Figur 4 Illustration af vandpakkernes bevægelser igennem vandløbsstrækningen hen over et tidsskridt.

Ved begyndelsen af tidsskridtet er vandløbsstrækningen fyldt op. Nedenfor er givet en forklaring til hvert trin:

Vandpakke (a) flyttes ud af vandløbsstrækningen og ved hjælp af ligning (11) beregnes, hvor meget vand der skal udveksles.

Næste vandpakke (b) flyttes frem til kanten, og det beregnes ved hjælp af ligning (4), hvor meget vand der skal udveksles. Efterfølgende foretages trin 1 for (b)

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

En del af vandpakke (c) er sendt ud over kanten, således at den mængde vand, der skal rutes passer. Pakkerne (d) og (e) er ført frem til deres slutposition.

Vandpakke (f) fra opstrøms forbindelser strømmer ind over randen, og det beregnes ved hjælp af ligning 0, hvor meget vand der skal udveksles.

Vandpakke (f) flyttes frem i vandløbet med ligning (4).

Vandpakke (g) føres ind i vandløbet. Herefter er vandløbsstrækningen fyldt op og tidsskridtet er taget.

I koden er algoritmen opdelt i tre trin. I trin 1 rutes det vand, der er i vandløbsstrækningen ved tidsskridtets begyndelse (Trin 1- 3 på figur 4). I trin 2 rutes den del af det indstrømmende vand som passerer hele vejen igennem vandløbsstrækningen (Ikke illustreret på figur 4). I trin 3 fyldes vandløbsstrækningen op med det resterende vand fra opstrøms forbindelser (Trin 4- 6 på figur 4).

Til hvert trin benyttes de styrende ligninger på forskellige måder:

Trin 1: Først beregnes, hvor stort et volumen vand der skal føres ud over kanten. Det gøres ved at sætte $V = 0$ og t til tidsskridtet i ligning (11):

$$Q_{\text{udveksling}} = V_0 \quad (12)$$

Herefter kan vandpakker i enden af vandløbsstrækningen rutes videre, så længe det samlede volumen ikke overstiger V_0 .

Sættes $V = 0$ i ligning (11) kan vi finde den tid det tager for et givent volumen at strømme ud over randen:

$$Q_{\text{udveksling}}$$

Når den tid er fundet kan det beregnes, hvor meget volumenet vil ændre sig. Vi kender volumenet, når udstrømningen begynder, vi kender udstrømningshastigheden, og vi kender den tid, det tager for hele vandpakken at løbe ud. Ændringen i volumenet må være:

$$\Delta V = -Q_{\text{udstrømning}} \cdot t - V_0 \quad (14)$$

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Trin 2:

Indstrømningstiden for en vandpakke er givet ved dens volumen delt med $Q_{\text{indstrømning}}$. Indsættes det udtryk i ligning 6 og sættes V til volumenet for vandløbsstrækningen, kan det volumen indstrømmende vand, der skal til for at fylde vandløbet, findes:

$$Q_{\text{udveksling}} \cdot V_0 \quad (15)$$

I trin 2 tages vandet så meget vand fra de opstrøms tilledninger, at den resterende mængde er lig V_0 fra ovenstående ligning. For en vandpakke der løber lige igennem vandløbsstrækningen kan ændringen i volumen findes ved følgende udtryk:

$$\Delta V = \frac{V_0 \cdot Q_{\text{udveksling}} - V_{\text{strækning}}}{Q_{\text{indstrømning}}} \quad (16)$$

For at finde den tid, det tager for en vandpakke at strømme igennem, kan vi dividere volumenet fundet i ligning (15) med indstrømningshastigheden:

$$t = \frac{1}{Q_{\text{udveksling}}} \ln \left| \frac{V_{\text{strækning}} \cdot Q_{\text{udveksling}}}{Q_{\text{strømning}}} + 1 \right| \quad (17)$$

Trin 3:

I trin 3 føres de resterende vandpakker ind i vandløbsstrækningen. Den tid det tager for en vandpakke at strømme ind beregnes ved at dele det oprindelige volumen med indstrømningshastigheden. Herefter kan tiden indsættes i ligning (7) og ændringen i volumen kan beregnes.

Specialtilfælde

Når et vandvolumen bevæger sig ned igennem et vandløb vil det ændre volumen eksponentielt. Det gør beregningen numerisk sensitiv. Hvis f.eks.

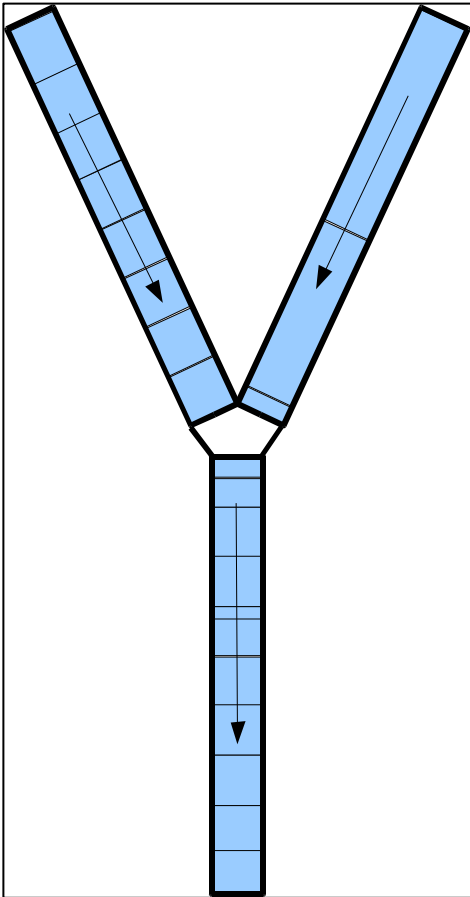
$Q_{\text{udveksling}} \cdot t > 10$ vokser volumen mere end 22000 gange. Den situation kan forekomme i et vandløb, hvor der er en meget stor indstrømning fra grundvandet og en meget lille vandtilførsel opstrøms fra. For at modellere den situation foretages der et indledende check på, at det indstrømmende vand maksimalt udgør 5 gange volumen af vandløbsstrækningen. Vand over den grænse tilføjes i stedet som indstrømmende vand fra opstrøms forbindelser.

Flere opstrøms forbindelser

Hvis et vandløb har flere opstrøms forbindelser blandes de vandpakker, der løber ind i vandløbsstrækningen på samme tid. Det gøres med en algoritme, der deler vandpakkerne op i dele så de kan blandes korrekt. Hvis eksempelvis flere små vandpakker løber ind i et vandløb samtidig med en meget stor vandpakke, fordeles den store vandpakke ud på de små. Det er illustreret i figur 5.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 5 Blanding af vandpakker ved konvergerende vandløbsstrækninger.

Fra de to opstrøms grene løber der i alt 11 vandpakker ind. Det betyder, at der efter samlingen i den nedstrøms gren også er 11 vandpakker. Det skulle så vidt muligt svare til den fysiske situation.

Kobling til grundvandet

Både søer og vandløb kan udveksle med grundvandet. Konkret er der implementeret en grundvandsrandbetingelse, der beregner udvekslingen ved hjælp af Darcys lov:

$$Q = K \cdot A \frac{H_{\text{waterbody}} - H_{\text{grundvand}}}{D} \quad (18)$$

Hvor Q er strømmingen, K er en hydraulisk ledningsevne, A er et kontaktareal, H er potentialet i vandelementet og grundvandet og D er en afstand mellem vandelementet og der hvor potentialet i grundvandet kendes.

Der er ingen begrænsninger på, hvor mange koblinger der kan laves mellem et vandelement og grundvandet. I søer hvor der forekommer samtidig indstrømning og udstrømning af grundvand bliver det modelleret ved at lave flere koblinger til grundvands-elementer med forskelligt potentiale. Ligeledes vil det være relevant

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

med mange koblinger, hvis man har direkte "seepage meter"-målinger som man ønsker at simulere. I det tilfælde angives en kobling for hvert "seepage meter", som sker over det areal som "seepage meteret" dækker. Herefter vil man kunne kalibrere et samlet udtryk for den hydrauliske ledningsevne, potentialet i grundvandet og afstanden. Haves en lang tidsserie, hvor der er variation i enten søens eller grundvandets potentiale, er det muligt, at man har information nok til at kalibrere separate værdier for den hydrauliske ledningsevne delt med afstanden og potentialet i grundvandet i stedet for et samlet udtryk.

Nedbør og fordampning

Nedbør simuleres meget simpelt ved, at der kan gives en tidsserie med nedbørs-værdier, som sammen med et areal angiver, hvor meget vand der tilledes i løbet af et tidsskridt. Der kan tilføjes flere forskellige nedbørs-randbetingelser, hvis nedbøren ikke kan antages at fordele sig jævnt hen over et vand-element.

Der er implementeret en meget simpel fordampningsmodel, hvor fordampningen angives i en tidsserie, som sammen med et areal angiver, hvor meget vand der skal fordampe. Vandet fordamper kun hvis det rent faktisk er tilstedet i vandelementet. Der kan tilføjes flere fordampningsrandbetingelser til det samme vandelement.

Transport

De enkelte vandelementer indeholder og transporter vand uden at "vide", hvad vandet indeholder. For at implementere transport er det derfor blot at tilføje funktionalitet til vandpakken, der holder styr på indholdet af stoffer. Det er gjort ved at tilføje en liste med mængden af kemikalier (Mol), som opdateres hver gang, der tilføjes nyt vand (Add) og hver gang, der fjernes vand (Substract). Hvis der fordamper vand, påvirker det ikke mængden af kemikalier, men koncentrationerne vil ændres i kraft af, at mængden af vand reduceres. Derudover er der tilføjet metoder, så man få adgang til koncentrationerne (SetConcentration og GetConcentration). Herefter er det blot at angive koncentrationerne i randbetingelserne på de stoffer, man ønsker at simulere.

Reaktiv transport

Ved reaktiv transport skal kemikalier kunne omsættes eller dannes som funktion af tiden. Igen er det noget der sker i vandpakken, som blot skal have at vide, at nu går tiden. Det gøres ved, at det vandelement, hvor vandpakken er, fortæller hvor lang tid der går ved at kalde metoden MoveInTime. Herefter kan vandpakken selv afgøre, hvad der skal ske. Denne arkitektur sikrer, at man i koden adskiller de kemiske reaktioner fra den fysiske transport af vandet. Derfor vil man kunne tilføje nye reaktioner blot ved at ændre et enkelt sted i koden.

I dette projekt har vi implementeret transport af Radon, som er en radioaktiv gasart, der henfalder med en halveringstid på 3,8 døgn. I jord dannes Radon kontinuert ved henfald af Uran, hvilket betyder, at koncentrationen i grundvand på et givent sted vil være nogenlunde konstant. Det gør Radon til en meget interessant tracer for interaktionen mellem grundvand og overfladevand, idet der er et signifikant

Sømod

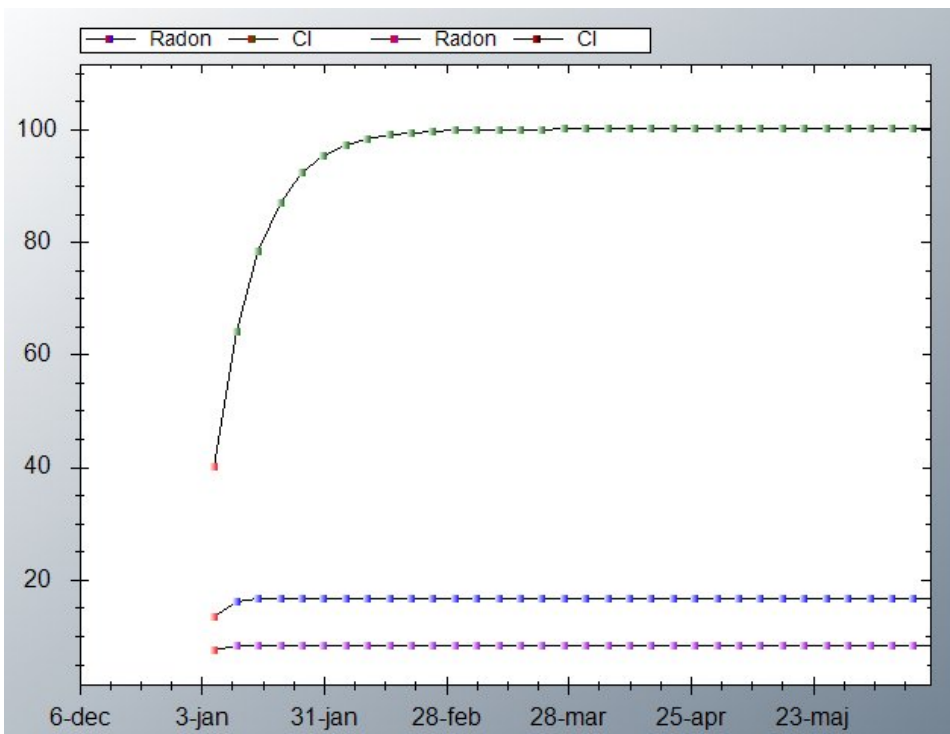
IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

forskelligt signal for de to vandtyper. Radioaktivt henfald kan beskrives ved en første ordens reaktion og følgende formel:

$$c_1 = c_0 e^{-k \cdot t} \quad (19)$$

Hvor c_1 er koncentrationen i slutningen af tidsskridtet, c_0 er koncentrationen i starten af tidsskridtet, k er henfaldskonstanten og t er størrelsen af tidsskridtet.

Der er gennemført et beregningseksempel med to søer, hvortil der strømmer grundvand indeholdende Radon og Chlorid. Den ene sø har et areal på 1 ha og er 4 m dyb, mens den anden sø har et areal på 4 ha og 1 m dyb. Opholdstiden i søerne er 1 måned, og halvdelen af det indstrømmende vand kommer fra grundvandet. Grundvandet har en koncentration af Radon på 200 bq/l og Chlorid på 200 mg/l. Vandet fra øvrige kilder indeholder ingen kemikalier. De resulterende koncentrationer ses i Figur 6. Efter et par måneder er der opnået steady-state. Chloridkoncentrationen bliver i begge søer 100 mg/l, idet halvdelen af søens vand kommer fra grundvandet. Radonkoncentrationen bliver derimod noget lavere, eftersom den dels nedbrydes og dels fordamper fra søernes overflade. Fordampningen er afhængig af søens overfladeareal og derfor opnås to forskellige niveauer i de to søer.



Figur 6 Simulerede koncentrationer af Radon og Chlorid i de to søer

IT-arkitektur og API

Her skal kort beskrives nogle af grundtrækkene og principperne omkring kodens arkitektur. HydroNet er objektorienteret og interface-baseret. Det betyder, at centrale klasser kan tilføjes med ny funktionalitet blot de opfylder påkrævede interfa-

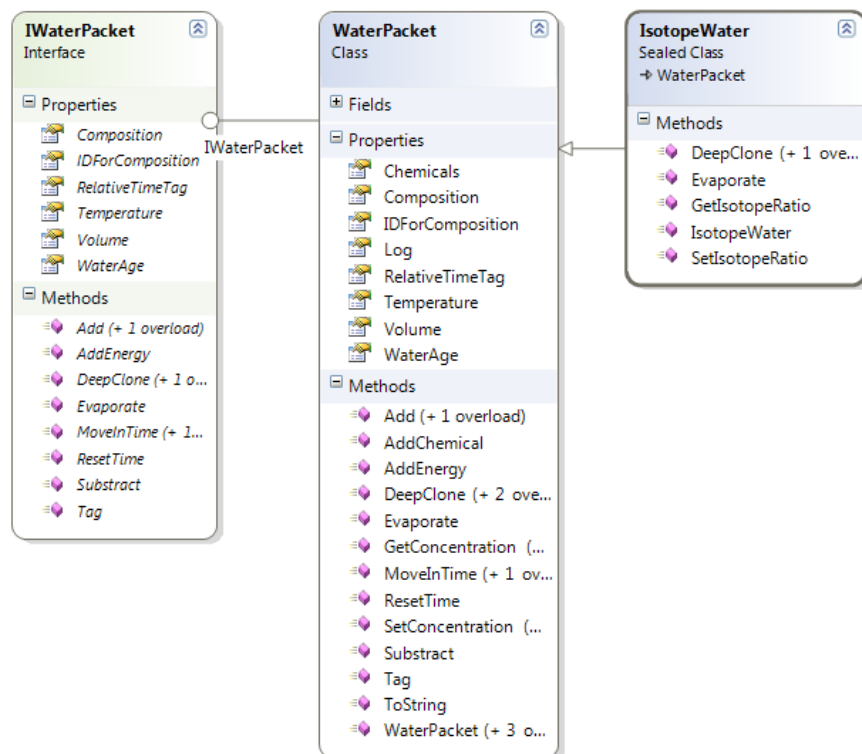
Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

ces. Endvidere er det muligt at programmere op imod HydroNet, således at man kan kombinere med egne modeller, trække output ud, stille på parametre under kørsel, optimering osv.

I designet af klasser har vi forsøgt at holde os så tæt på den fysiske verden som muligt. Eksempelvis er der en klasse for et vandløb og en klasse for en sø.

Interfacet *IWaterPacket* beskriver egenskaber og metoder for en vandpakke. De fleste metoder svarer direkte til den fysiske verden. Det er eksempelvis muligt at tilføje vand med metoden *Add*, og man kan fjerne vand ved hjælp af metoderne *Substract* eller *Evaporate*. Metoden *MoveInTime* skal bruges til at vurdere transporttider eller til reaktiv transport, hvor tiden har betydning. Her vil man eksempelvis fortælle vand-objektet, at nu er der gået to dage, hvorefter eventuelle tidsafhængige reaktioner vil forløbe. Vi har implementeret to vand-objekter (se figur 7). En standard-implementering, som modellerer vand med kemikalier og en nedrivning herfra, som også kan håndtere fraktionering af ilt isotoper. Iltisotoper har forskellig vægt, og derfor vil vand med de lette iltisotoper fordampe hurtigere end vand med de tunge iltisotoper. Det betyder, at forholdet mellem iltisotoperne ændres ved fordamning, og der vil være et forskelligt signal i grundvand, overfladevand og nedbør. Der er mulighed for at specificere en tidsserie, hvor koncentrationen i det fordampede vand angives. Hvis den fordampede koncentration er forskellig fra koncentrationen i vandet vil der ske en relativ ændring af koncentrationen. Implementeringen er baseret på Krabbenhoft et al. (1990).



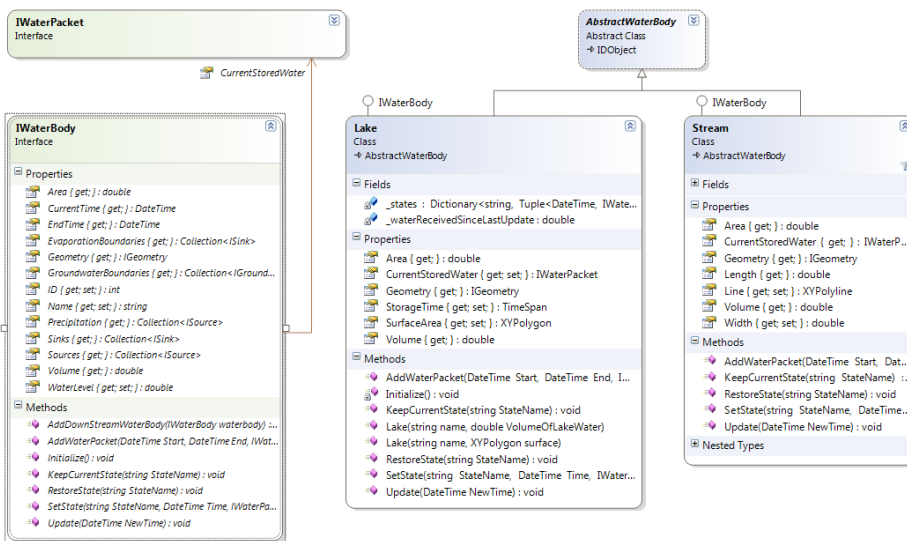
Figur 7 Interfacet *IWaterpacket* og klasserne der implementerer det.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Interfacet *IWaterBody* beskriver kravene til et vand-element. De skal kunne modtage vand fra opstrøms elementer (*ReceiveWater*) og rute det videre til nedstrøms elementer (*Update*). Derudover skal der kunne tilføjes randbetingelser såsom nedbør og fordampning. Randbetingelserne er beskrevet ved de to interfaces *IWaterSinkSources* og *IEvaporationBoundary*.

Foreløbigt er der implementeret to vand-elementer til at beskrive henholdsvis søer og vandløb. Figur 8 viser implementeringerne i et klassediagram.



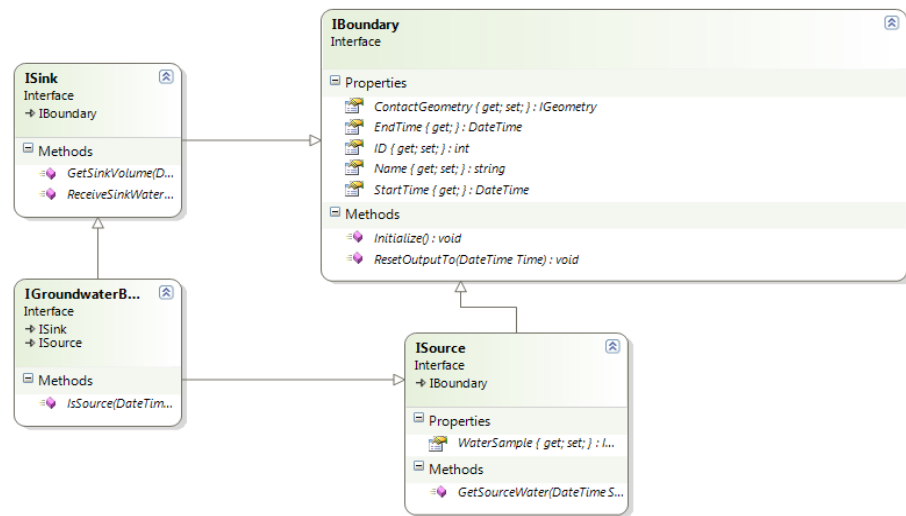
Figur 8 Interfacet *IWaterBody* og klasserne *Lake* og *Stream*, der implementerer det.

De egenskaber og metoder, som er ens for søer og vandløb, er implementeret i den abstrakte klasse *AbstractWaterBody*, som de begge nedarver. De to typer af vand-elementer har forskellig geometri, idet arealet for en sø er defineret ved et polygon, hvor arealet for et vandløb er defineret ved en bredde og en linje. Derudover har de forskellige algoritmer til at rute vandet, og derfor har de hver deres implementering af metoden *Update*.

Figur 9 viser et UML-diagram over de interfaces der beskriver randbetingelserne. *IBoundary* indeholder simpel information omkring geometri og den periode som randbetingelsen gælder for. Alle randbetingelser skal opfylde det. Derudover kan de opfylde enten *ISink* eller *ISource* eller begge dele, som det ses en *IGroundWaterBoundary* gør. En *ISource* har egenskaben *WaterSample* der bruges til at angive, hvad det er for en type vand, den pågældende randbetingelse tilfører vandelementet. Selve randbetingelsen ved altså ikke, hvad vandet indeholder, og derfor behøver vi ikke ændre i koden på randbetingelserne, når vi skal transportere et nyt stof.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 9 Interfaces til beskrivelse af randbetingelser.

Brugerflade

Et af kendetegnene ved HydroNet-modellen er, at den er meget fleksibel og skalerbar. En HydroNet-model kan bestå af en enkelt sø med en simpel vandbalance, og den kan bestå af et helt vandløbsnetværk med komplicerede randbetingelser koblet til andre modeller. Derfor har den mange forskellige anvendelsesmuligheder og henvender sig til meget forskellige brugere.

En god brugerflade er designet ud fra den anvendelse, den skal have, og vi mener derfor ikke, at det er hensigtsmæssigt med kun én brugerflade til en model som HydroNet. En sådan brugerflade ville enten blive så kompliceret, at den ville være uanvendelig til de meget simple modeller eller for simpel og besværlig at anvende til de mere komplicerede modeller. Vores tilgang vil i stedet være at lave nogle målrettede brugerflader, der er designet specielt til en specifik anvendelse.

I vores foreløbige arbejde med modellen har vi haft brug for en brugerflade, der kunne samle resultaterne for en enkelt sø, og det er derfor den brugerflade der er tilgængelig nu.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 10 En brugerflade til HydroNet-modellen, som kan vise resultater for et vandelement (Sø eller vandløb).

I venstre side kan man indlæse HydroNet-modeller og ved en træstruktur får man adgang til de enkelte vandelementer. Når et vandelement (sø eller vandløb) vælges vises dens randbetingelser og simuleringsresultater. Øverst til venstre vises randbetingelserne til søen. De er opdelt i sinks, som typisk vil være fordampning, sources, som typisk vil være nedbør, og til sidst udveksling med grundvand. Vælger man en af randbetingelserne vil man øverst til højre få vist detaljeret information. Nedenunder er der opsummeret en række simuleringsresultater. Diagrammet til højre viser de forskellige bidrag til vandbalancen opgjort i brugervalgte perioder. Ligeledes angives opholdstiden for perioden.

OpenMI tilpasning af HydroNet modellen

For søer er der tale om en lang række interagerende processer – hydrologiske, meteorologiske, kemiske, og biologiske. For mange enkeltprocesser findes der gode modeller, både kommercielle og open source modeller. Disse kan imidlertid ikke umiddelbart kobles, så de tilsammen kan simulere søens opførsel. Det er ikke kun inden for sø-modellering, at dette problem eksisterer. Generelt set, anses det som vigtigt at tage alle interagerende processer i regning i en dynamisk samlet model, altså at anvende integreret modellering.

Med det formål at gøre integreret modellering mulig blev der i perioden fra 2002 til 2004 lavet et stort EU finansieret projekt – HarmonIT, som havde til formål at udvikle en IT teknologi og IT standard, så modeller fra forskellige domæner og uafhængige leverandører let kunne kobles til sammenhængende systemer. Den udviklede standard hedder OpenMI (Gregersen et. al. 2007) og vedligeholdes af den internationale organisation OpenMI Association (www.Openmi.org). Nogle af kendetegnene ved OpenMI er, at modellerne er fuldt dynamisk koblede (de udveksler data i begge retninger under simuleringerne), hvilket er essentielt for beskrivelsen af de interagerende processer i en sø. Yderligere gør OpenMI det muligt at koble modeller, som har forskellig geometri, som f.eks. en todimensional sø-model og en

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

tredimensional grundvandsmodel, eller en nuldimensional nitrat model og en to-dimensional hydraulisk model. Endeligt er OpenMI indrettet således, at eksisterende modeller forholdsvis let kan gøres kompatible, man skal altså ikke lave modellerne forfra.

HydroNet modellen er kompatibel med OpenMI standarden og kan dermed indgå som en komponent i et IT-system for søer, som er en modificeret udgave af det generelle open source OpenMI system. På den måde vil HydroNet modellen kunne afvikles sammen med andre relevante modeller. Grundideen er, at man for konkrete sørestaureringsprojekter bygger systemet af de mest relevante modeller for det specifikke tilfælde og dermed undgår at lave unødigt komplekse systemer. F.eks. i nogle tilfælde er det nødvendigt at anvende en fuldt distribueret grundvandsmodel, mens det i andre tilfælde er mere hensigtsmæssigt med en simpel konceptuel beskrivelse af grundvandet.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Nedbør-afstrømningsmodul - HydroCat

Når der skal laves sø-modellering er det vigtigt at have styr på den overordnede vandbalance. I den forbindelse er det vigtigt at kunne håndtere indstrømningen til søen. Der findes i mange tilfælde kun korte tidsserier for indstrømningen. Hvis en søs tilstand skal modelleres for en længere årrække er dette ikke tilstrækkeligt. Her kan det være hensigtsmæssigt at anvende en nedbør-afstrømnings model.

Vi har valgt at implementere afstrømningmodellen, som er beskrevet af Steen Asger Nielsen og Eggert Hansen (Nielsen og Eggert 1973). Den model er valgt, fordi den er udviklet til og fungerer godt for danske forhold. Vi har kaldt vores implementering for HydroCat. Samme model anvendes i DHI's Mike produkter under navnet NAM i en let modificeret udgave.

HydroCat er en konceptuel model, som tager tidsserier for nedbør, temperatur og potentiel fordampning som input og beregner afstrømningen. I sammenhæng med SØMOD projektet anvendes HydroCat til beregning af indstrømningen til en sø. HydroCat modellen skal kalibreres mod målte afstrømninger. Den typiske situation er, at metrologiske data findes for lange tidsperioder, hvorimod lange tidsserier for afstrømninger oftest ikke findes. Her kan HydroCat kalibreres for den korte periode, hvor alle data er til rådighed og efterfølgende, ved hjælp af de lange metrologiske tidsserier forlænge den målte afstrømningstidsserie. Yderligere kan man anvende HydroCat modellen til scenariekørsler, som f.eks. øget nedbør som konsekvens af klimaforandringer.

HydroCat modellen kan også anvendes for afstrømningsområder, hvor der ikke findes afstrømningsdata til kalibreringen. I sådanne tilfælde genanvendes modelparametre, der er estimeret fra et afstrømningsområde, som hydrologisk forstand ligner området. Med denne metode må man dog forvente betydelig større usikkerhed på den beregnede afstrømning.

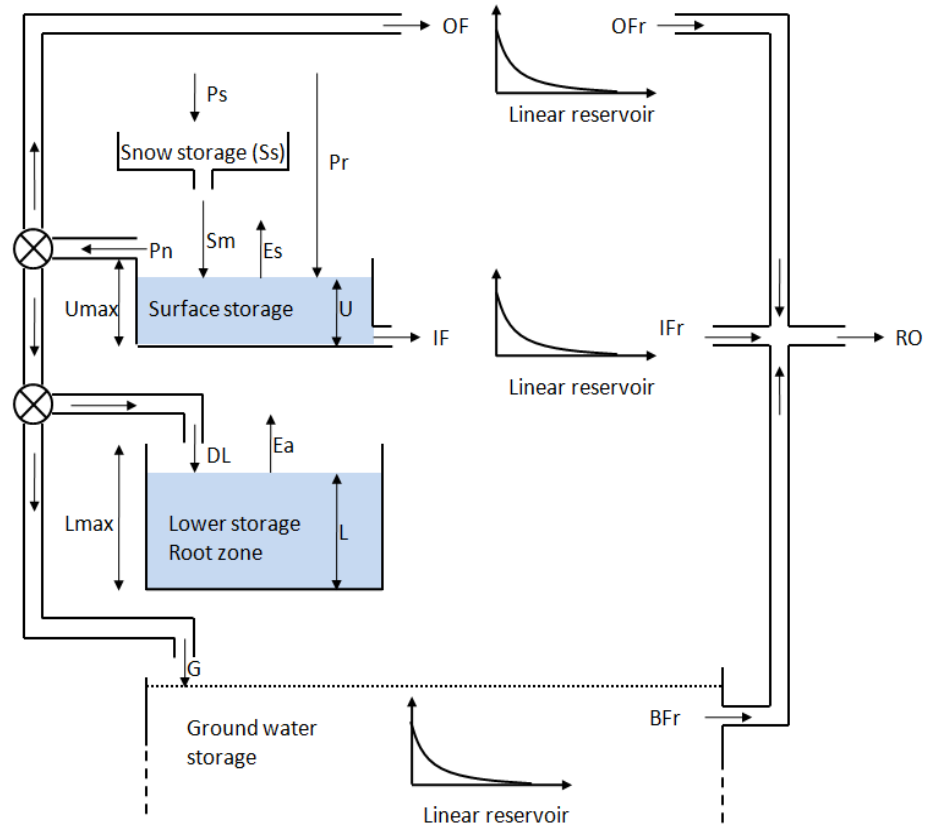
HydroCat konceptet.

HydroCat kører med et fast tidsskridt på et døgn. For hvert tidsskridt ekstraheres gennemsnitsværdier for det pågældende døgn for nedbør, potentiel fordampning og temperatur fra input tidsserierne. Alle strømninger og magasineringer regnes i millimeter, hvor det for strømninger opfattes som millimeter pr. døgn. Den beregnede afstrømning bliver dermed specifik afstrømning (strømning pr. areal), som kan konverteres til den rigtige afstrømning ved at gange med afstrømningsområdets areal og konverterer enheden til m^3/s .

HydroCat modellen indeholder fire magasiner; snemagasin, overfladevandsmagasin, rodzonemagasin, og grundvandsmagasin. Yderligere findes der tre lineære reservoirer, som sørger for, at overfladeafstrømningen, interflow og baseflow bliver tidsligt forsinket.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Den konceptuelle opbygning af modellen er vist på figuren nedenfor.

Figur 11 Konceptuel model for HydroCat

For hvert tidsskridt (n) udføres følgende operationer:

Den samlede nedbør (P), potentiel for dampning (E), og middeltemperatur (T) for tidsskridtets døgn udtrækkes af input tidsserierne.

Hvis temperaturen er under nul falder nedbøren som sne og tilføjes sne magasinet (snow storage (S_s)). Er temperaturen nul eller over nul tilføjes nedbøren til overflademagasinet (surface storage (U)). Samtidig genereres snesmeltning, som er proportional med temperaturen målt i grader celsius.

$$Pr_n = \begin{cases} P_n & ; T_n \geq 0 \\ 0 & ; T_n < 0 \end{cases} \quad (20)$$

Hvor Pr er regn.

$$Ps_n = \begin{cases} P_n & ; T_n < 0 \\ 0 & ; T_n \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Hvor P_s er snefald.

$$S_{m_n} = \begin{cases} \min(T_n \times C_s, S_{s_{(n-1)}}) & ; T_n \leq 0 \\ 0 & ; T_n \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Hvor S_m er snesmeltning, C_s er en brugerdefineret snesmeltningkoefficient, og S_s er den aktuelle snemængde i snemagasinet.

Snemagasinet (S_s) opdateres:

$$S_{s_n} = S_{s_{(n-1)}} + P_{s_n} - S_{m_n} \quad (23)$$

Overflademagasinet (U) opdateres:

$$U_n = U_{(n-1)} + P_{r_n} + S_{m_n} \quad (24)$$

Fordampning fra overflademagasinet (E_s), beregnes som det mindste tal af potentiel fordampning og den aktuelle vandmængde i overflademagasinet.

$$E_{s_n} = \min(U_n, E_n) \quad (25)$$

Fordampningen fratrækkes overflademagasinet:

$$U_n = U_n - E_{s_n} \quad (26)$$

Den del af den potentielle fordampning, som ikke har givet anledning til fordampning fra overflademagasinet bidrager til fordampning/evapo-transpiration fra rodzonen (E_a):

$$E_a = \begin{cases} \frac{(E_n - E_{s_n}) \times L_{(n-1)}}{L_{max}} & ; \text{for } E_n > E_{s_n} \\ 0 & ; \text{for } E_n \leq E_{s_n} \end{cases} \quad (27)$$

Hvor L er det vandindholdet i rodzonen og L_{max} er den mængde vand rodzonen kan indeholde inden vandet infiltrerer til grundvandsmagasinet (også kaldet markkapacitet).

Interflow (IF) er vand, som dræner lateralt fra rodzone til vandløbet og ikke når grundvandet. Interflowet beregnes som følger:

$$IF_n = \begin{cases} CIF \times \frac{\frac{L_{(n-1)}}{L_{max}} - TIF}{1 - TIF} \times \min(U_n, U_{max}) & ; \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}} > TIF \\ 0 & ; \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}} \leq TIF \end{cases} \quad (28)$$

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Hvor CIF og TIF er dimensionsløse brugerdefinerede parametre større end nul og mindre end en.

Herefter opdateres overflademagasinet:

$$U_n = U_{n-1} - IF_n \quad (29)$$

Overskudsnedbøren (P_n) kan nu beregnes:

$$P_n = \begin{cases} U_n - U_{max} & ; U_n > U_{max} \\ 0 & ; U_n \leq U_{max} \end{cases} \quad (30)$$

Overflademagasinet opdateres:

$$U_n = \min(U_n, U_{max}) \quad (31)$$

Den del af P_n som bidrager til overfladeafstrømning (OF) beregnes som følger:

$$OF_n = \begin{cases} COF \times \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}} \frac{TOF}{1 - TOF} \times P_n & ; \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}} > TOF \\ 0 & ; \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}} < TOF \end{cases} \quad (32)$$

Hvor COF og TOF er en dimensionsløse brugerdefineret parametre større end nul og mindre end en.

Den del af P_n , som infiltrerer til rodzonen (DL) beregnes på følgende måde:

$$DL = \frac{P_n - OF_n}{1 - \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}}} \quad (33)$$

Vandindholdet i rodzone kan nu opdateres:

$$L_n = L_{(n-1)} - E_{\alpha_n} + DL \quad (34)$$

Den resterende del overskudsnedbøren (P_n) infiltrerer til grundvandsmagasinet:

$$G_n = (P_n - OF_n) \times \left(1 - \frac{L_{(n-1)}}{L_{max}}\right) \quad (35)$$

Overfladeafstrømningen, interflow og baseflow routes gennem et lineært reservoir:

$$OF_n = OF_{(n-1)} \times e^{-\frac{1}{\alpha\theta}} + OF_n \times \left(1 - e^{-\frac{1}{\alpha\theta}}\right) \quad (36)$$

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Hvor OFr er det routede overlandflow og Ko er den brugerdefinerede tidskonstant for reservoiret.

$$IFr_n = IFr_{(n-1)} \times e^{-\frac{1}{K_o}} + OFr_n \times \left(1 - e^{-\frac{1}{K_o}}\right) \quad (37)$$

Hvor IFr er det routede interflow, og Ki er den brugerdefinerede tidskonstant for reservoiret.

$$BFr_n = BFr_{(n-1)} \times e^{-\frac{1}{K_i}} + IFr_n \times \left(1 - e^{-\frac{1}{K_i}}\right) \quad (38)$$

Hvor BFr er det routede baseflow (grundvandsudstrømning) og Kb er den brugerdefinerede tidskonstant for reservoiret.

Afstrømningen (RO) kan nu beregnes:

$$Ro_n = (OFr_n + IFr_n + BFr_n) \times A \quad (39)$$

vor A er afstrømningsområdets areal

Anvendelse af HydroCat modellen

Tidsserier:

For at kunne anvende HydroCat modellen skal man bruge tidsserier for nedbør, temperatur og potentiel fordampning, som dækker den periode hvor man vil beregne afstrømninger. Yderligere skal der bruges en kortere tidsserie med målte afstrømninger. HydroCat modellen anvender daglige værdier med enheden millimeter, med da tidsserierne håndteres af HydroNumerics-Time modulet, behøver input tidsserierne ikke ligge som daglige værdier i millimeter. Time modulet laver automatisk de nødvendige konverteringer.

Parameter:

HydroCat modellen anvender 11 kalibreringsparametre og 6 initial værdier. Alle disse bestemmes ved hjælp af kalibreres mod de målte afstrømninger

- Interflow koefficient (CIF)
- Interflow tidskonstant (ki)
- Interflow tærskel værdi (TIF)
- Overland flow koefficient (COF)
- Overland flow tidskonstant (Ko)
- Overland flow tærskelværdi (TOF)
- Overflademagasin volumen (Umax)
- Rodzone maksimal volumen (Lmax)
- Snesmeltnings koefficient (Cs)
- Grundvandsstrømnings tidskonstant (Kb)
- Arealet af afstrømningsområdet (A)

Sømod

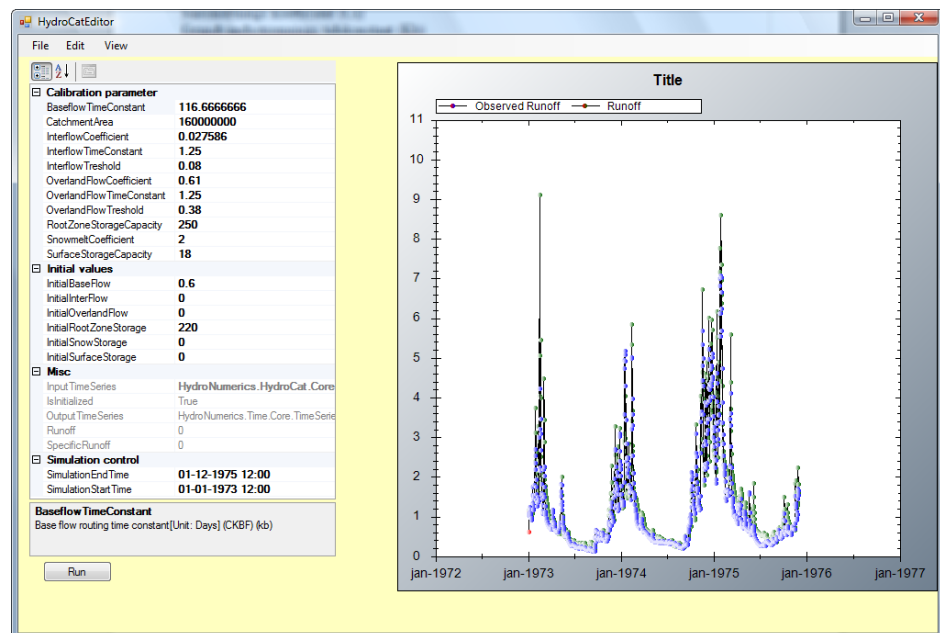
IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Initial værdier:

- Vandindhold i overflademagasinet (U)
- Vandindhold i rodzonen (L)
- Sneindhold i snemagasinet (Ss)
- Overfladestrømning (OF)
- Interflow (IF)
- Grundvandsstrømning (BF).

Brugerflade

Der er til HydroCat lavet en simpel, men fuldstændig brugerflade.



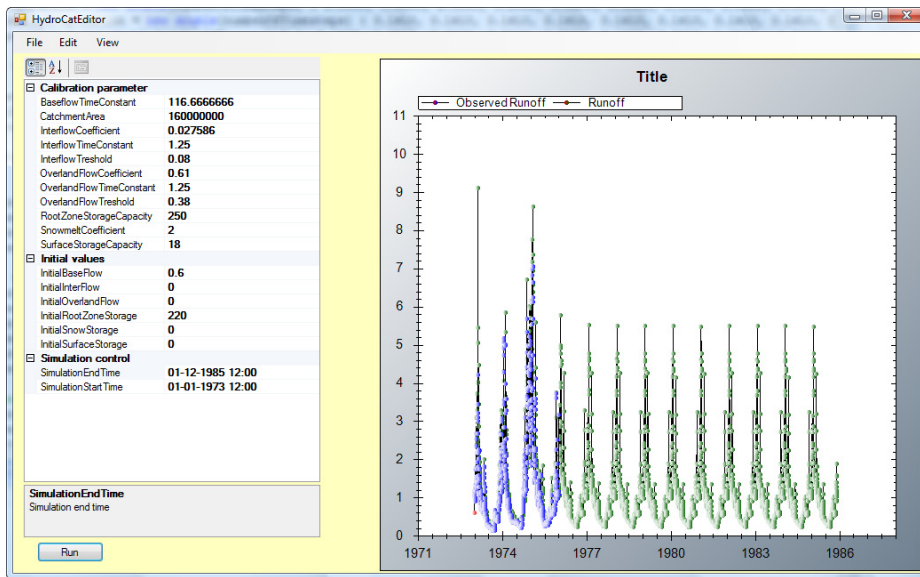
Figur 12 Brugerflade til HydroCat.

Når brugerfladen startes, er der allerede defineret default værdier for alt. Herefter kan man importere de tidsserier (nedbør, fordampning, temperatur og observeret afstrømning), som man ønsker at anvende. Modellen køres ved, at trykke på run knappen. En kørsel afvikles på under et sekund. På figuren ovenfor ses simulerede (grøn) og målte (blå) afstrømninger for Liver Å.

Ønsker man at se afstrømningen for en længere periode ændres simuleringens slut-tidspunkt, som vist nedenfor.

Sømod

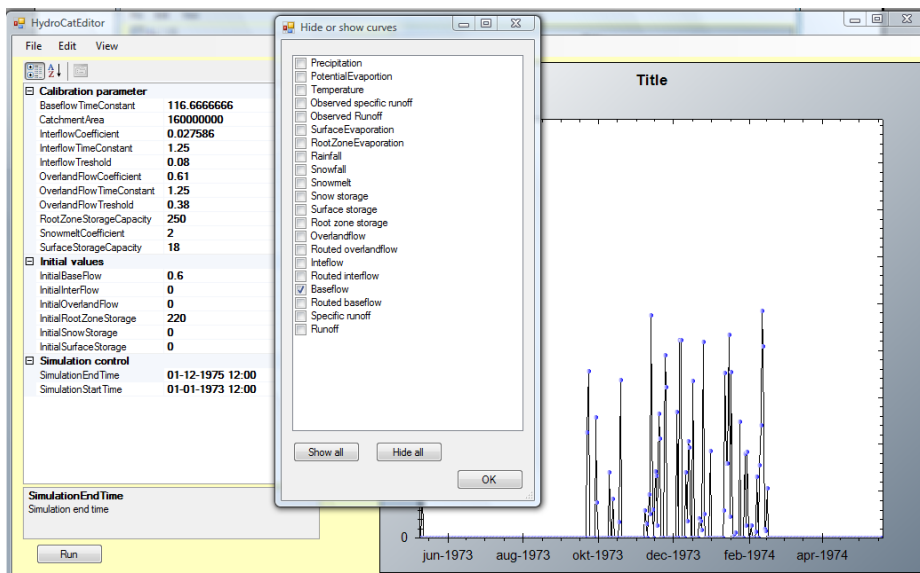
IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 13 HydroCat beregningseksempel for Liver Å.

Der er ved simuleringen, som er vist ovenfor anvendt syntetiske klimadata, da vi p.t. ikke har adgang til historiske data. Derfor ligner alle afstrømningerne efter 1975 hinanden.

Ud over simulerede afstrømninger kan resultater for samtlige strømninger mellem modellens magasiner og deres volumen udtrækkes af modellen. På figuren nedenfor er tilskuddet til grundvandet vist. På figuren kan man endvidere se, hvilke andre datatyper der er til rådighed.



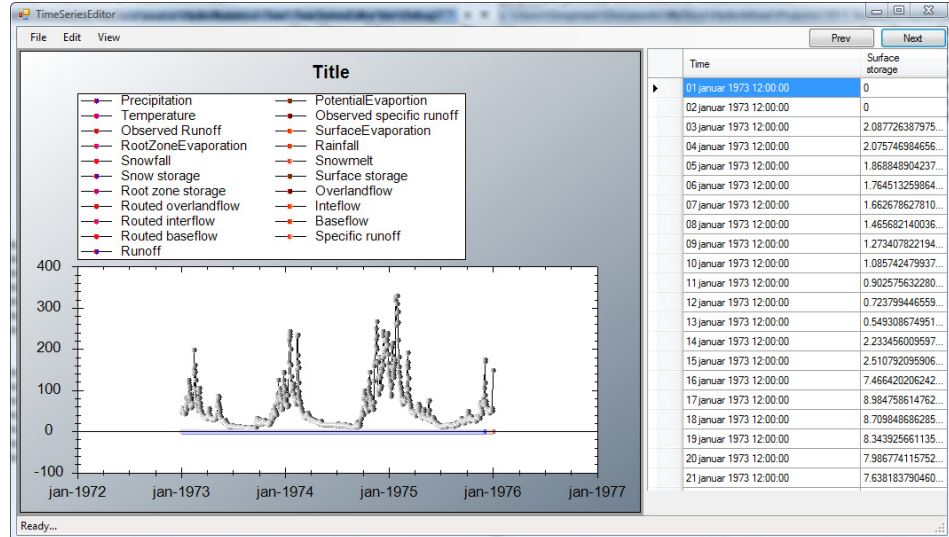
Figur 14 Tilskud til grundvand samt øvrige resultatyper.

Alle resultaterne kan gemmes til en tidsseriegruppe, som kan anvendes af tidsserie editoren, hvor man har mere direkte adgang til de specifikke værdier (Se figur 15).

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Yderligere vil disse data kunne indgå i OpenMI systemer, idet de som HydroNumerics-tidsserier er OpenMI kompatible.



Figur 15 HydroCat resultater vist i Tidsserieeditoren.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Værktøj til håndtering af tidsserier

Tidsserier

HydroNet modellen er en dynamisk model. Modellen simulerer udvekslingen mellem søvand og grundvand over en given tidsperiode. Under simuleringen læser modellen data for randbetingelserne som f.eks. observeret nedbør, temperatur eller grundvandspotentialer. Internt i modellen fortages der tidsskridt således, at værdier for et tidsskridt beregnes på baggrund af beregnede værdier og randbetingelser for det forrige tidsskridt. De beregnede resultater udskrives til filer, der ligeledes er tidsserier. Derfor vil håndtering af tidsserier udgøre en substantiel del af modellen. For at gøre det muligt for udviklere i fremtiden at videreudvikle på modellen eller at udnytte dele af modellen til andre formål (HydroNet er open source) er der lagt stor vægt på, at selve programkoden er så simpel og overskuelig som muligt. Derfor er hele håndteringen af tidsserier lagt i et separat modul. Det betyder, at modellens beregningskerne bliver meget simple og samtidig vil tidsserie-modulet kunne anvendes i andre sammenhænge.

Umiddelbart virker det banalt at håndtere tidsserier. Tidsserier er jo blot en samling af sammenhængende værdier af tid og værdi. Programmeringsmæssig håndtering af tidsserier er da heller ikke svært, men ekstremt besværligt. Derfor giver det rigtig god mening at isolere al funktionalitet vedrørende tidsserier i et veltestet modul, så man ikke skal rode med det mere end højst nødvendigt.

Tidspunkt og tidsperiode baserede tidsserier

Tidsserier kan opdeles i to typer: Tidspunkt-baserede (time stamp based) og tidsperiode-baserede (timespan based). Når man måler en vandstande over tid, vil det typisk resultere i en tidspunktbaseret tidsserie. Den enkelte målte vandstand gælder for et specifikt tidspunkt. Men for f.eks. nedbør er det en anden sag. Når man måler nedbør, foregår det i princippet ved, at man lader det regne i et målebæger over en periode. Den vandmængde, som er akkumuleret i bægeret kan omsættes til den gennemsnitlige nedbør for perioden. Den målte tidsserie bliver altså en tidsperiode baseret tidsserie. De to typer tidsserier optræder også i numeriske modeller. Konceptuelle modeller regner typisk på en vandbalance over et tidsskridt. Derfor vil en sådan model fordre, at input, så som indstrømning til modellen, repræsenterer middelstrømningen over beregningstidsskridtet. Ligeledes vil outputtet repræsentere gennemsnitsværdier for et tidsskridt. Andre typer modeller, så som fysisk baserede modeller kan anvende værdier, som svarer til et specifikt tidspunkt. Tidsseriemodulet er derfor designet til både at kunne repræsentere begge typer tidsserier og kunne konvertere værdier fra den ene type til den anden.

Enheder og dimensioner

Værdierne i en tidsserie vil have både en enhed og en dimension. Når data skal trækkes ud af en tidsserie og overføres f.eks. til en model er det nødvendigt at håndtere enheden korrekt. Modellen forventer at få data leveret i en bestemt enhed, men værdierne i tidsserien har måske en anden enhed. For at muliggøre au-

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

tomatisk konvertering af data fra en enhed til en anden er der i tidsseriemodulet anvendt en standarddefinition af enheder. Denne definition består af:

- Enhedsnavn (f.eks. "millimeter pr. dag")
- Konverteringsfaktor til SI systemet
- Offset til SI Systemet

Med den information til rådighed er det muligt at konvertere værdier fra en hvilken som helst enhed til en hvilken som helst anden enhed.

Dimensioner defineres ved 8 potenser svarende til længde, masse, tid, temperatur, molaritet, elektrisk strømstyrke, lysintensitet, og valuta. Det er kun det første 5 potenser, som har relevans for HydroNet modellen, men for fuldstændighedens skyld er alle 8 medtaget. En vandføring med enheden $m^3/sek.$ vil således have en dimension defineret ved længde med potensen 3 og tid med potensen -1. Tidsseriemodulet kan ikke, som det er tilfældet for enheder, foretage nogen egentlig konvertering mellem dimensioner. Dimensionerne anvendes alene til, at f.eks. HydroNet modellen kan gøre en bruger opmærksom på, at de anvendte dimensioner ikke passer sammen. Altså at undgå at man ved en fejl blander pærer og bananer sammen.

Interpolation og ekstrapolation

Typisk er målte data registreret med en tidslig opløsning og den model, som tidsserien skal danne input til, anvender en anden tidslig opløsning (tidsskridtlængde). Derfor har tidsseriemodulet indbygget funktionalitet til at interpolere, ekstrapolere og aggregere. Konceptet er, at når f.eks. en model skal anvende en værdi til et bestemt tidspunkt eller tidsperiode bliver GetValues metoden in tidsseriemodulet (tidsserieklassen) kaldt med tidspunktet eller tidsperioden som argument. Tidsseriemodulet returnerer efterfølgende den efterspurgte værdi. I denne forbindelse vil modulet interpolere, ekstrapolere eller aggregere. Alle operationer er lineære. I forbindelse med ekstrapolation bliver en såkaldt relaxationfactor anvendt. Er værdien af relaxationfaktoren nul anvendes der fuld lineær ekstrapolation. Er værdien en, bliver den nærmeste værdi anvendt uden ekstrapolation. Og er værdien mellem nul og en er ekstrapolationen dæmpet. Denne funktionalitet er indført for at man kan håndtere problemer med numerisk instabilitet i de numeriske modeller.

Tidsserie fil format

Tidsserie modulet kan gemme eller læse tidsserier fra XML filer. Tidsserier samles til tidsseriegrupper, som så gemmes samlet. Der er anvendt XML format, fordi det kan læses og forstås via en normal teksteditor. Yderligere er det let at tilgå fra andre programmer.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Et eksempel på en tidsseriefil med blot en tidsserie er vist nedenfor.

```
<?xml version="1.0"?>
<TimeSeriesGroup xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instan
  <TimeSeriesList>
    <TimeSeries Name="Flow" Id="0">
      <TimeValues>
        <TimeValue Time="2008-06-02T12:00:00" Value="0.2" />
        <TimeValue Time="2008-06-03T12:00:00" Value="0.2" />
        <TimeValue Time="2008-06-04T12:00:00" Value="0.3" />
        <TimeValue Time="2008-06-05T12:00:00" Value="0.2" />
        <TimeValue Time="2008-06-06T12:00:00" Value="0.3" />
        <TimeValue Time="2008-06-07T12:00:00" Value="0.3" />
        <TimeValue Time="2008-06-08T12:00:00" Value="0.1" />
        <TimeValue Time="2008-06-09T12:00:00" Value="0.1" />
        <TimeValue Time="2008-06-10T12:00:00" Value="0.2" />
        <TimeValue Time="2008-06-11T12:00:00" Value="0.2" />
      </TimeValues>
      <Description>Flow at station 123</Description>
      <Unit>
        <Description>cubic meters pr second</Description>
        <ConversionFactorToSI>1</ConversionFactorToSI>
        <OffsetToSI>0</OffsetToSI>
        <ID>m3/sec</ID>
      </Unit>
      <Dimension>
        <AmountOfSubstance>0</AmountOfSubstance>
        <Currency>0</Currency>
        <ElectricCurrent>0</ElectricCurrent>
        <Length>3</Length>
        <LuminousIntensity>0</LuminousIntensity>
        <Mass>0</Mass>
        <Temperature>0</Temperature>
        <Time>-1</Time>
        <ObjectID>a21becba-2137-4f48-9831-6b8ea61105ec</ObjectID>
      </Dimension>
      <RelaxationFactor>0</RelaxationFactor>
      <TimeSeriesType>TimeStampBased</TimeSeriesType>
    </TimeSeries>
  </TimeSeriesList>
</TimeSeriesGroup>
```

Figur 16 Eksempel på tidsserie format

Programkoden

Tidsseriemodulet er programmeret i programmeringssproget C#. Dette sprog ud-mærker sig ved at det understøtter objektorienteret programmering. Yderligere er det sammen med Java blandt de mest anvendte programmeringssprog.

I objektorienteret programmering samler man datastrukturer og funktionalitet i såkaldte klasser. Det betyder, at alt den kompleksitet, som hører til tidsserier, kan samles i nogle få klasser. Det giver dem, som anvender klasserne, mulighed for at lave meget kraftfulde programmer med meget lidt kode.

De to vigtigste klasser i tidsseriemodulet er selve tidsserieklassen (TimeSeries) og klassen til håndtering af tidsseriegrupper (TimeSeriesGroup).

Et overblik over den funktionalitet, som de to klasser stiller til rådighed, er vist på figurerne nedenfor.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

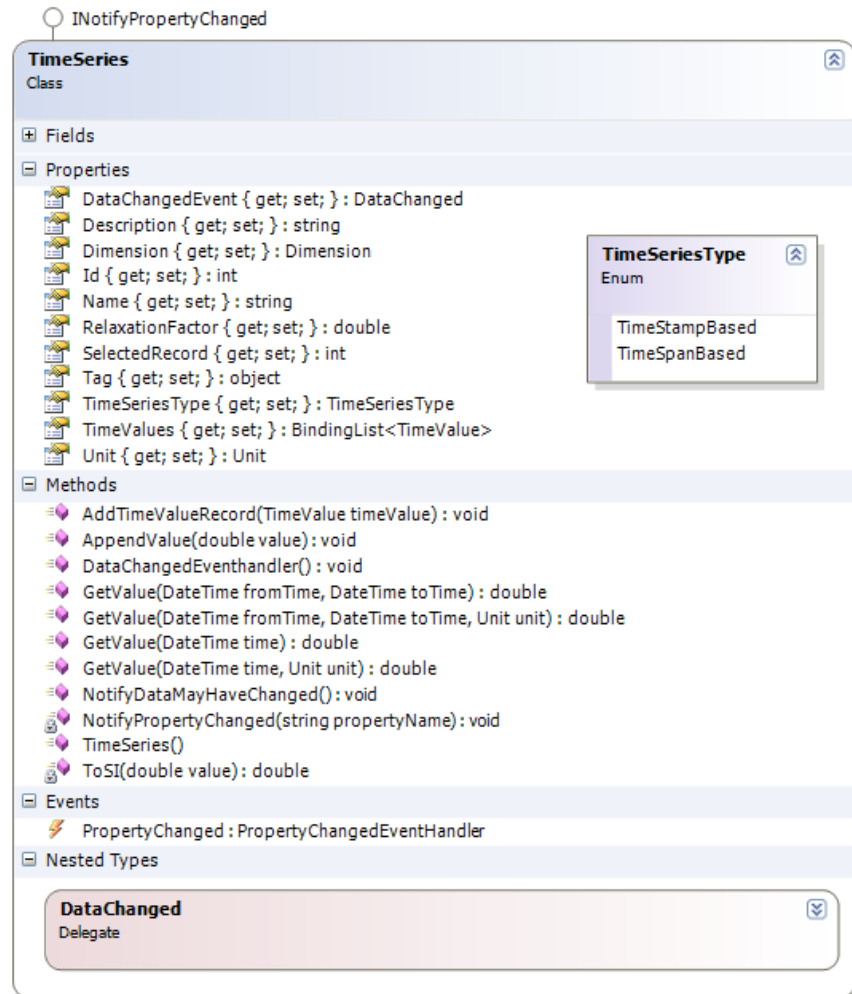


Figure 17 Klassediagram for TimeSeries-klassen.

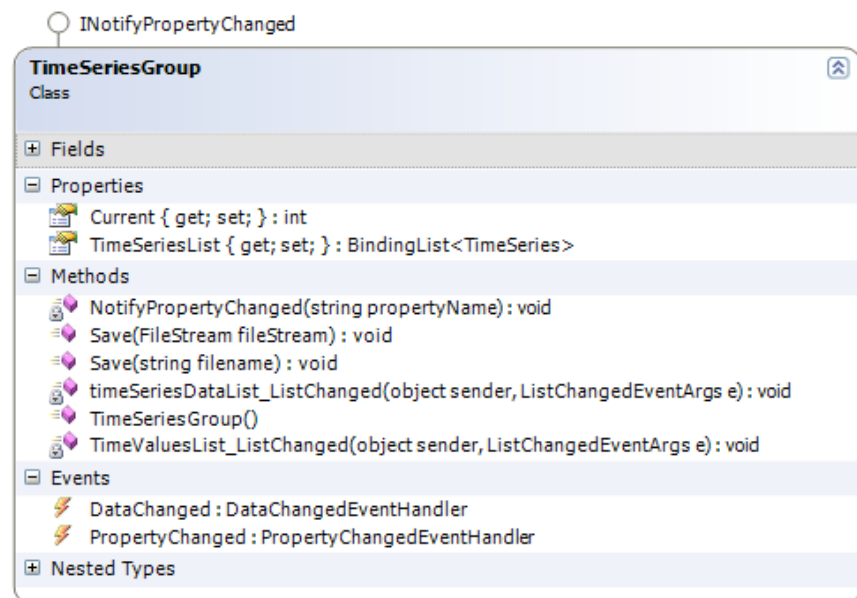


Figure 18 Klassediagram for TimeSeriesGroup.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Dokumentation for funktionaliteten af de enkelte metoder er skrevet i selve programkoden. Det er hensigtsmæssigt, fordi den programmør, som anvender klasserne kan få dokumentationen vist direkte i det programmeringsværktøj, der anvendes.

Eksempler på anvendelser af tidsseriemodulet

Nedenfor er vist et eksempel på, hvordan tidsserieklasserne kan anvendes i programkode.

```
public void Example()
{
    // Load timeseries file and assign first timeseries to timeseries object --
    TimeSeriesGroup timeSeriesGroup = TimeSeriesGroupFactory.Create(@"c:\tmp\flow.xls");
    TimeSeries timeSeries = timeSeriesGroup.TimeSeriesList[0];

    // change the unit
    timeSeries.Name = "Flow";
    timeSeries.Unit.ID = "m3/sec";
    timeSeries.Unit.ConversionFactorToSI = 1.0;

    // Add more data. The values are automatically inserted at the correct location in the timeseries.
    timeSeries.AddTimeValueRecord(new TimeValue(new System.DateTime(2010, 1, 1, 12, 0, 0), 0.2));
    timeSeries.AddTimeValueRecord(new TimeValue(new System.DateTime(2010, 1, 2, 12, 0, 0), 0.3));

    // Append data to end of the timeseries file. The corresponding time is automatically calculated
    // by incrementing the time for the last record by the timeperiod between the last two records.
    timeSeries.AppendValue(0.23);
    timeSeries.AppendValue(0.3);

    // Get value for a specific time. In this case the value is interpolated between the nearest
    // records in the time series. The returned value is in SI units regardless of which unit the
    // values inside the timeseries are using.
    double x1 = timeSeries.GetValue(new System.DateTime(2010,1,1,18,0,0));

    // Get value for a specific time period. The returned value corresponds to the mean value for the
    // specified time period. The value is in SI units regardless of which unit the values inside the
    // timeseries are using.
    System.DateTime fromTime = new System.DateTime(2010, 1, 1, 12, 0, 0);
    System.DateTime toTime = new System.DateTime(2010, 1, 4, 0, 0, 0);
    double x2 = timeSeries.GetValue(fromTime, toTime);

    // Get a value that is converted to a specific unit.
    Unit myUnit = new Unit("l/sec",0.001,0.0);
    double x3 = timeSeries.GetValue(new System.DateTime(2010,1,1,18,0,0),myUnit);

    //Save the timeseries to a XML file.
    timeSeriesGroup.Save(@"c:\tmp\flow01.xls");
}
```

Figur 19 Kodeeksempel med Tidsserier.

Som alt andet software udviklet i Sømod projektet er tidsseriemodulet open source. Koden kan ses og/eller hentes her:

<http://code.google.com/p/hydronumerics/source/browse/#svn/trunk/HydroNumerics/Time>

Test

Som nævnt tidligere er den grundlæggende ide med at udskille tidsserier til et separat modul, at man ikke skal besværes af noget, som har med tidsseriehåndtering at gøre, når man laver den numeriske model. Derfor er det helt essentielt, at modulet er meget grundigt testet. Testningen af tidsseriemodulet foretages vha. såkaldt unit testning. For hver eneste funktion (method) og variabel (property), som kan tilgås eksternt, laves et testprogram. Alle disse test bliver afviklet hver gang, der er lavet ændringer til modulerne. Testene tjener yderligere som gode eksempler på, hvordan klasserne i modulet kan anvendes. Det er almindelig praksis blandt program-

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

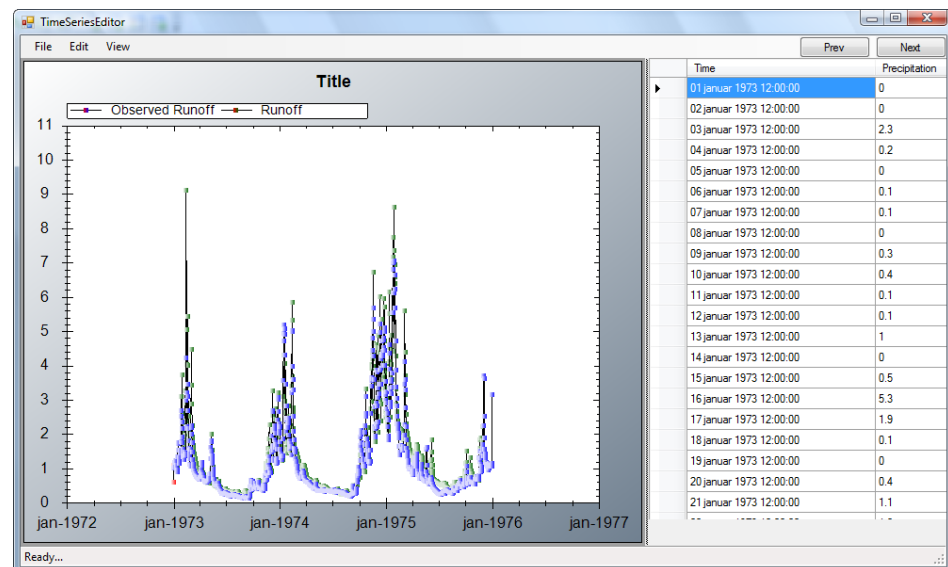
mører at anvende sådanne tests som vejledning. (testene ligger sammen med koden på open source serveren).

Visualisering af tidsserier

Det er helt essentielt at kunne få en grafisk repræsentation af en tidsserie. Til tids-seriemodulet er der udviklet en plotte-komponent, som kan anvendes både som plug-in til grafiske brugerflader og til tidsserie-editoren (se nedenfor).

Tidsserie editor

Der er langt fra hensigtsmæssigt at skulle arbejde direkte med tidsseriefilerne i XML formatet via en teksteditor. Derfor er der i Sømod projektet udviklet en tids-serieeditor. Med editoren kan brugeren arbejde med tidsseriedata i et regnearks-lignede miljø, hvor den grafiske repræsentation af dataene kan ses samtidig med, at man editere værdierne.



Figur 20 Tidsserieeditoren.

Tidsserieeditoren har følgende funktionalitet:

- Filhåndtering
 - Lave nye tidsseries grupper
 - Åbne en tidsseriegruppe fra en fil
 - Importere enkelte tidsserier fra en tidsserie fil.
 - Tilføje en ny tidsserie til en tidsserie gruppe.
 - Slette en tidsserie fra en tidsserie gruppe
 - Gemme tidsserie gruppen til XML.
- Ændre tidsserie egenskaber
 - Enheder (navn, konverteringsfaktorer, mm)
 - Dimensionen
 - Navn og beskrivelse
 - Interpolations og ekstrapolations metoder
- Tidsserie plottet
 - Zoom og pan

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

- Vise tid, værdi og navn for punkter når musen kører over dette
- Vælge hvilke tidsserier der ønskes vist
- Tidsserie griddet
 - Ændre værdier og tider
 - Vise tilhørende værdi i plottet (vist som rødt punkt i plottet)
 - Tilføje nye værdier
 - Cut and paste (f.eks. til og fra Excel)

Når tidsseriefiler gemmes genereres der automatisk en lille xml fil, som gør det muligt direkte at linke tidsserien til OpenMI kompatible modeller eller moduler.

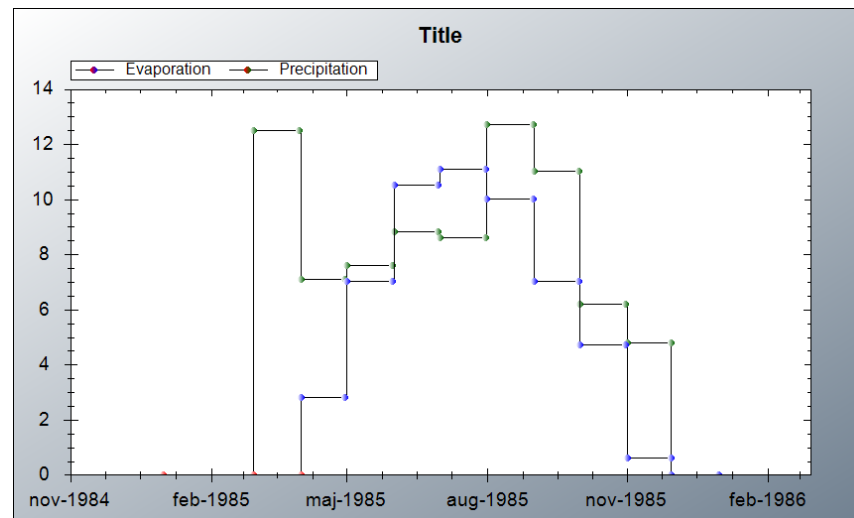
Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

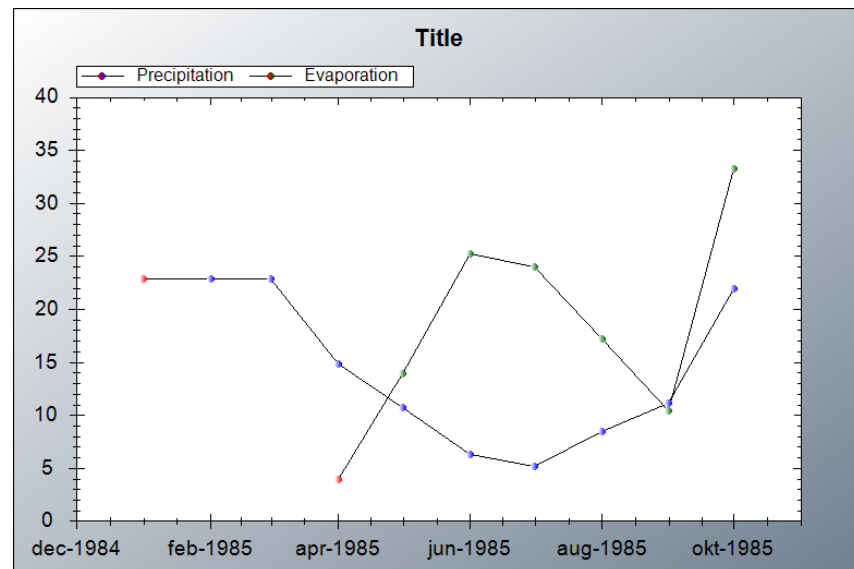
Model anvendelser, test og evaluering

Modellering af opkoncentration ved fordampning

For at teste implementeringen af vand, der kan håndtere opkoncentration ved fordampning har vi simuleret datasættet fra Krabbenhoft et al. (1990). De havde over en periode på to år målt den relative koncentration af $^{18}\text{O}_2$ i indstrømmende grundvand, søvand, nedbør og beregnet den i fordampet vand. I grundvandet og søvandet var der ingen årstidsvariation, hvilket der var i nedbør og fordampning (se figur 21 og figur 22). Ved at beregne et vægtet gennemsnit for koncentration i nedbør og fordampning kunne de ved en simpel massebalance beregne den gennemsnitlige årlige indstrømning af grundvand. Der var hverken tilløb eller afløb fra søen.



Figur 21 Nedbør og fordampning i cm/måned.

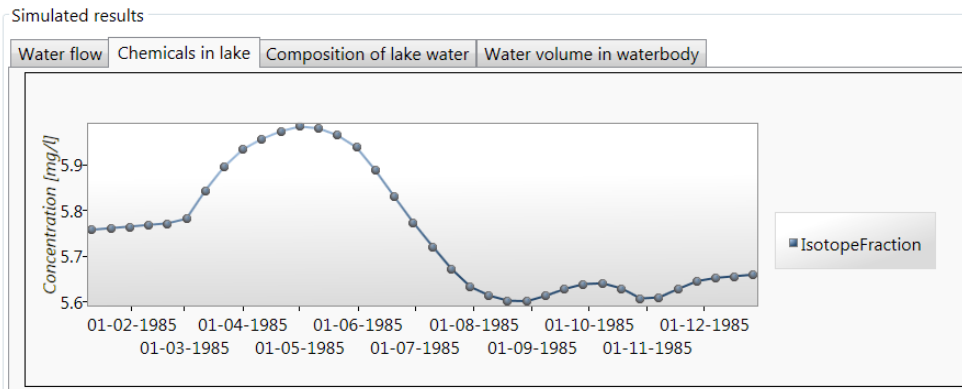


Figur 22 Iltisotopkoncentration i nedbør og fordampning.

Sømod

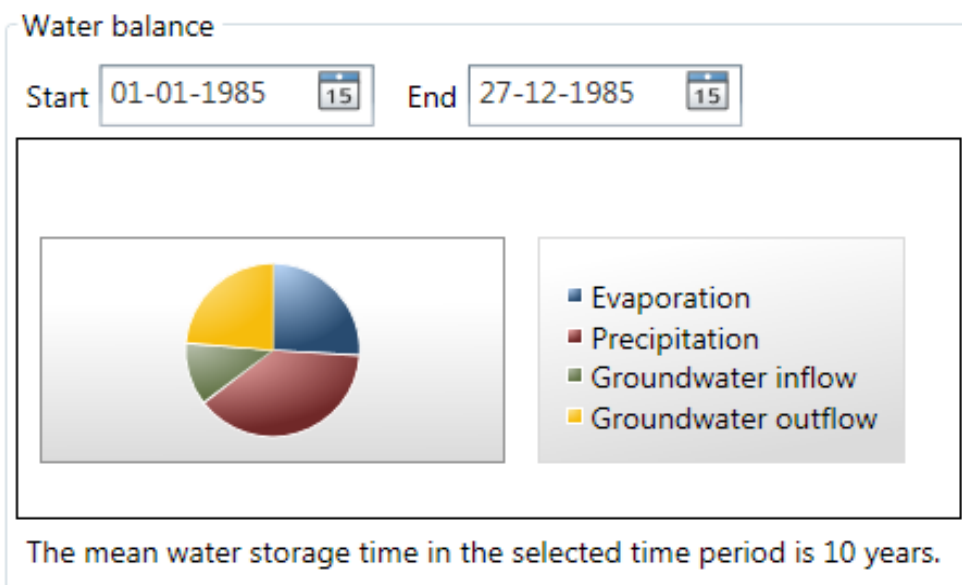
IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Vi har indsat deres tal i en HydroNet-model og kørt modellen i et år. Den resulterende koncentration i søen ses i nedenstående figur.



Figur 23 Modelleret ilt-isotopkoncentrationen i søen. Data fra Krabbenhoft et al. (1990). Bemærk at vi modellerer koncentrationer i mg/l og ikke negative procenter. De numeriske værdier er de samme.

Koncentrationen er nogenlunde i ligevægt omkring gennemsnitsværdien på 5,75, og vi kan derfor konkludere, at modellen er implementeret korrekt. På figur 24 er HydroNets vandbalance for søen vist.



Figur 24 Vandbalance og opholdstid fra Krabbenhoft et al. (1990) eksempel.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Vedsted sø

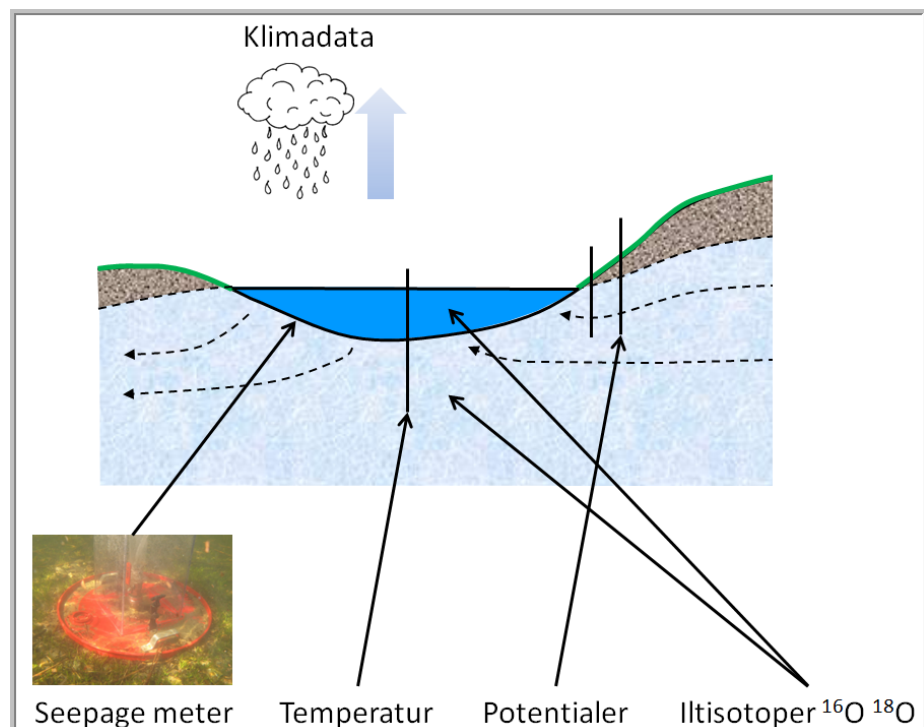
Vedsted Sø ligger i Sønderjylland, 10 km sydvest for Haderslev. Vedsted Sø har et overfladeareal på 7,7 ha og er dyb i forhold til dens størrelse (maksimal dybde ca 12m). Søen har ingen tilløb eller afløb, kun et mindre kildevæld i det sydøstlige hjørne af søen.



Figur 25 Vedsted Sø.

Målinger

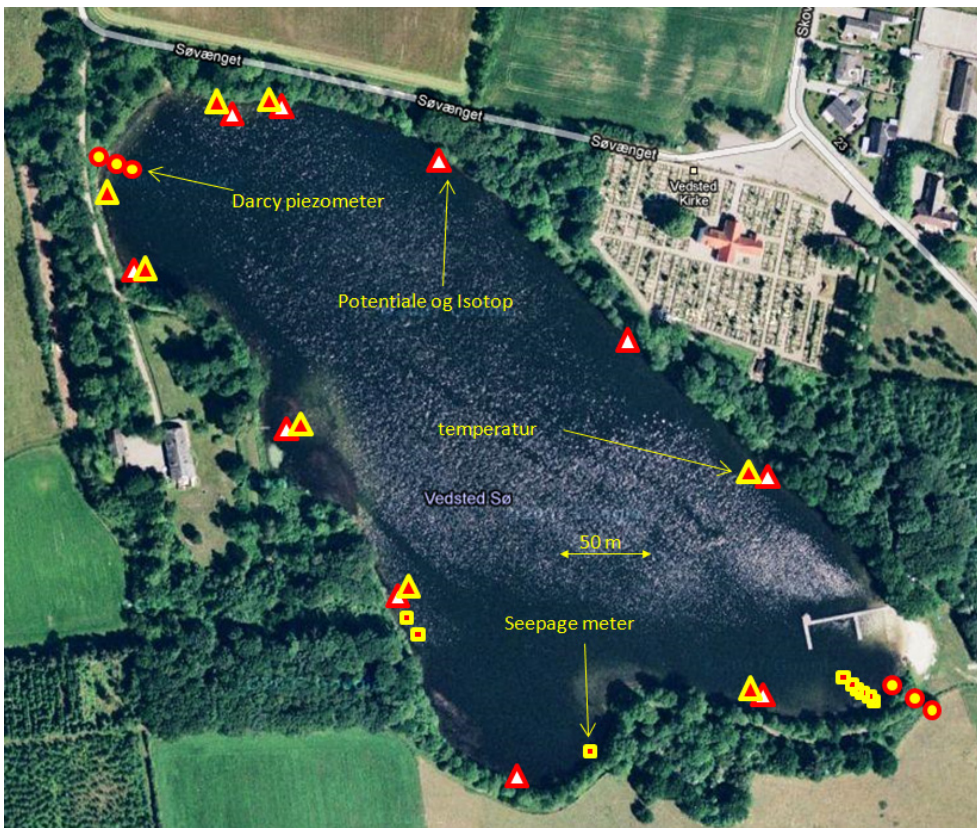
Søen udmærker sig ved, at der er foretaget en række forskellige målinger med henblik på at estimere udvekslingen mellem søvand og grundvand, som vi har fået adgang til (Hansen & Wodschow 2008). Målingerne er vist skematisk på figur 26 og deres geografiske placering er vist på figur 27.



Figur 26 Skematisk fremstilling af målingerne ved Vedsted Sø.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 27 Placering af målinger ved Vedsted Sø.

En kort beskrivelse af principperne i de enkelte metoder er givet nedenfor.

Seepagemeter

Et seepagemeter er en overskåret olietønde med en opsamlingspose, der benyttes til at lave direkte målinger af grundvandsfluxen i grænsefladen mellem sediment og vand. Hvis det hydrauliske trykniveau i grundvandet står højere end vandstanden i søen, vil der være grundvandsindstrømning, og der vil derfor strømme vand ind i seepagemeteret gennem grænsefladen, hvilket registreres ved et stigende vandvolumen i opsamlingsposen. Er det hydrauliske trykniveau lavere end søens vandstand, vil der være udstrømning fra søen, vandet vil forlade seepagemeteret og vandvolumenet i opsamlingsposen vil blive reduceret. Jo større volumenændring over tid, jo større er grundvandsfluxen.

Der er i Vedsted sø foretaget målinger med seks placeringer af seepagemeter. Målingerne sker over en periode på mellem 19 og 26 timer.

Piezometre

Når man kender grundvandspotentialet i samme vandførende lag to steder med kendt afstand, samt den hydrauliske ledningsevne for det vandførende lag, kan man beregne grundvandsstrømningen vha. Darcys lov. Ved Vedsted sø er der lavet to transekter, hver med 3 piezometre til bestemmelse af gradienter for grundvandspotentialet. Piezometerne er filtersat cirka en meter under søbunden.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Temperaturmålinger

Der er 8 steder i søen målt temperaturprofiler i søbunden. Målingerne sker vha. et temperaturspyd, som trykkes omkring en meter ned i sedimentet. Herefter kan temperaturen i seks dybder registreres, vha. sensorer, som er placeret på spyddet. Disse målinger kan omsættes til vandstrømning ved invers modellering.

Potentialer

Der er målt grundvandspotentialer i søbunden i en række boringer tæt på søbredden. (se figur 27). Disse potentialer er sammenlignet med vandstanden i søen for at bestemme, om der er udstrømning eller indstrømning gennem søbunden.

Isotop målinger.

Der er målt $\delta^{18}\text{O}$ i søvandet og i prøver fra boringerne i søen (samme boringer som er anvendt til potentiale målinger). Isotop sammensætningen for grundvand og overfladevand er forskellig, hvilket kan udnyttes til at beregne grundvandsudvekslingen.

Model

Der er blevet opsat en simpel HydroNet-model for søen, som kun indeholder et søelement. Der er ikke nogen udstrømning fra søen, men der er indstrømning fra et mindre kildevæld. Der er følgende målinger af indstrømningen:

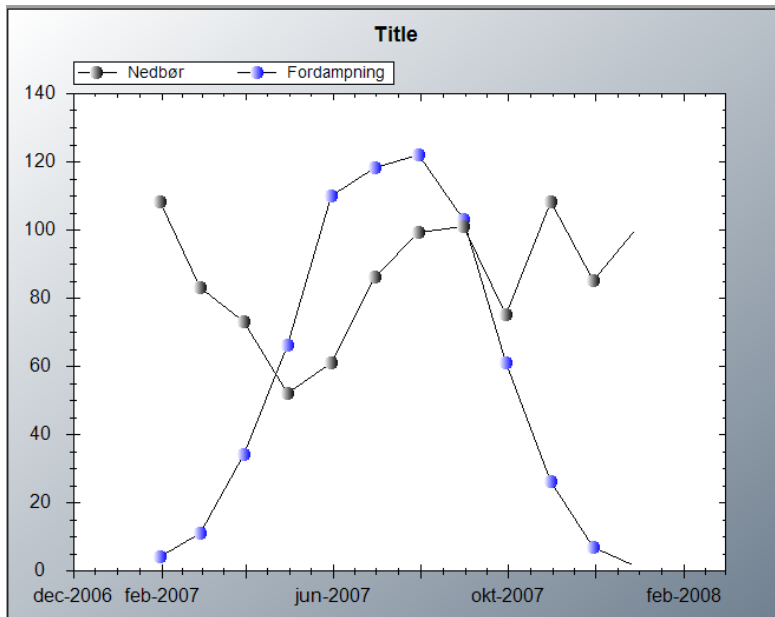
Dato	Indstrømning [$\text{m}^3/\text{år}$]
12. - 13. marts 2007	6986
3. - 4. april 2007	5894
24. - 26. april 2007	1205

Der ses en betydelig variation i indstrømningen, som givetvis er korreleret med nedbøren. For at udnytte dette datasæt optimalt kunne det overvejes at koble med en nedbør-afstrømningsmodel for søens opland. Vi har dog vurderet at tre målinger vil være for lidt til at kalibrere HydroCat-modellen. Derudover kender vi heller ikke oplandet til vandløbet. I stedet modellerer vi blot indstrømningen som en randbetingelse med varierende indstrømning. Tidsseriemodulets funktionalitet til ekstrapolation anvendes med en relaxationsfaktor på 1, således at den første værdi anvendes i perioden op til 12. marts 2007 og den sidste værdi anvendes i hele perioden efter den 24. april. Imellem 12. marts og 24. april interpoleres lineært mellem de to nærmeste værdier

I 2007 var nedbøren og fordampningen, som vist på figur 28

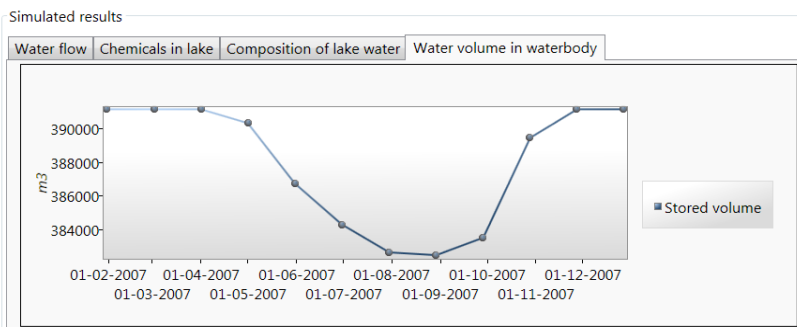
Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

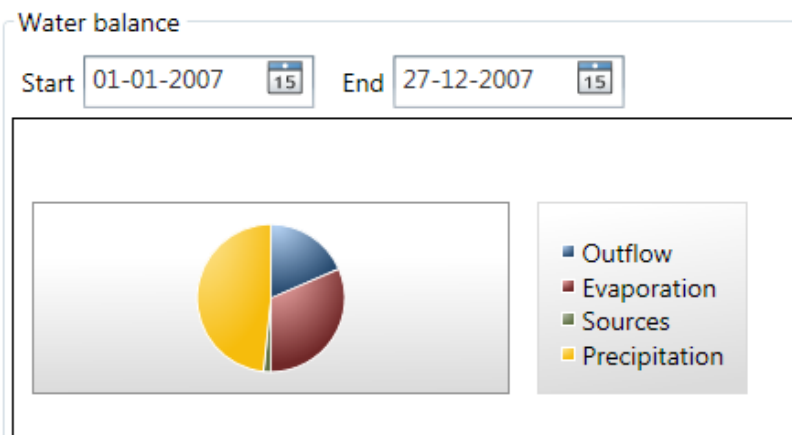


Figur 28 Nedbør og fordampning for Vedsted Sø i 2007 i mm/måned.

Der er herefter foretaget en simulering på et år med månedlige tidsskridt. Resultaterne for søens volumen og vandbalance ses i figur 29 og figur 30.



Figur 29 Simuleret vandmængde i søen.



The mean water storage time in the selected time period is 4 years.

Figur 30 Vandbalance og opholdstid for vandet i søen.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Figur 29 viser, hvordan vandmængden i søen falder om sommeren, hvor fordampningen overstiger nedbøren. Om vinteren er nedbøren højere end fordampningen, hvilket giver udstrømning fra søen. Det kan ses på vandbalancen på figur 30 hvor "outflow" og "evaporation" tilsammen er lige så store som "precipitation" og "sources". I virkeligheden er der ikke udstrømning fra søen, så enten stiger vandstanden om vinteren, eller også bliver den holdt fast af udveksling med grundvandet.

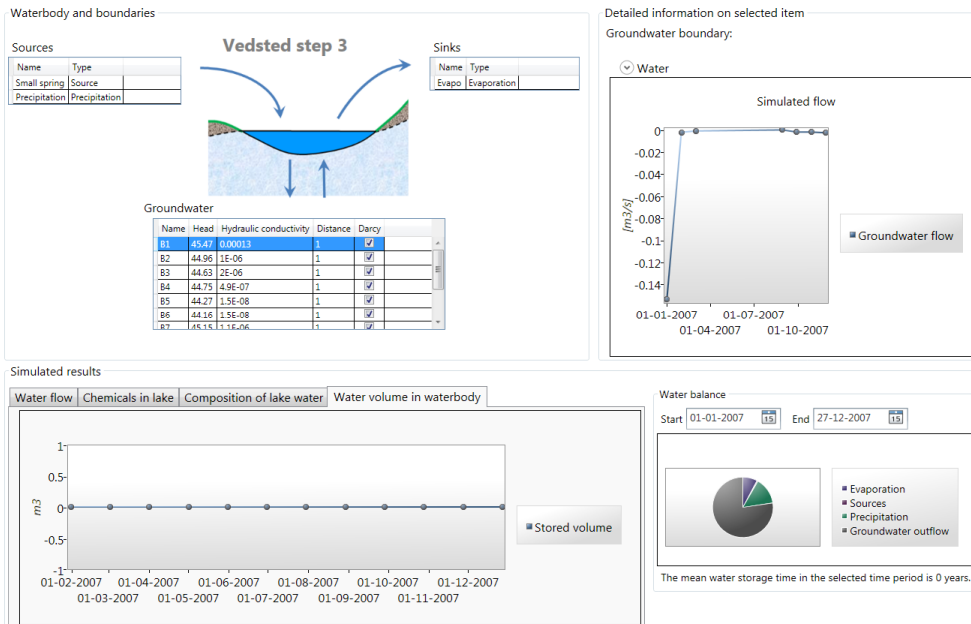
For at simulere udvekslingen med grundvand har vi taget udgangspunkt i data fra de 10 B-boringer, hvor der er målt hydraulisk ledningsevne og potentiale under søen. For at modellere det laves en grundvandsrandbetingelse for hver observation. Her er det nødvendigt at angive et areal for at beregne strømmingen, og vi har valgt at dele søens areal imellem de 10 randbetingelser.

Boring	Hydraulisk ledningsevne [m/s]	Trykniveau [kote m]
B1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	45,47
B2	$1,0 \cdot 10^{-6}$	44,96
B3	$2,0 \cdot 10^{-6}$	44,63
B4	$4,9 \cdot 10^{-7}$	44,75
B5	-	44,27
B6	$1,5 \cdot 10^{-8}$	44,16
B7	$1,1 \cdot 10^{-6}$	45,15
B8	$1,1 \cdot 10^{-6}$	44,54
B9	$2,1 \cdot 10^{-8}$	45,4
B10	$3,5 \cdot 10^{-6}$	45,16

Vandstanden i søen er i kote 45,7 m, så vi kan med det samme konkludere, at der ikke vil strømme vand op i søen, idet alle målte potentialer er under det niveau. Resultatet efter et års simulering er vist i nedenstående figur.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 31 Output fra HydroNet simuleringen af Vedsted Sø med indstrømning, nedbør, fordampning og grundvandsudveksling.

Når modellen kører med de nye randbetingelser fås det, at søen tømmes i løbet af det første tidsskridt ved boring B1. På figur 31 ses øverst til højre udstrømningen ved B1, der i løbet af det første tidsskridt er meget stor. Nederst til højre vises volumen af vand i søen, og det bemærkes at søen er tom gennem hele simuleringen. Vandbalancen er domineret af grundvandsudstrømningen. Modellen svarer meget dårligt til den fysiske situation. Vi kan heraf konkludere, at enten er målingerne forkerte eller også har vi gjort nogle fejlagtige antagelser. Det er sandsynligvis antagelsen om den ligelige fordeling af søens areal på de 10 boringer, der ikke er rimelig. Men hvilket areal skal der så tilskrives de enkelte målinger? Eller med andre ord hvordan skal de enkelte punktmålinger opskaleres så de gælder for hele søen? For at kunne gøre det på rimelig vis, ville det kræve rigtig mange målinger, hvilket ikke er praktisk muligt. Derfor kan den slags målinger næppe bruges kvantitativt til at bestemme vandbalancen for en sø, men kun kvalitativt til at sige noget om strømningsretningen.

Målingerne med seepagemeter og af temperaturen samt potentialerne i transekter har de samme problemer med opskalering. Eftersom vi skal have et areal, der dækker hele søen og vi ikke har nogen mulighed for at gøre det, kan den slags punktmålinger ikke rigtig bruges i model som HydroNet der er baseret på en vandbalance.

Målingen af ilt-isotop er derimod mere relevant, fordi den integrerer alle indstrømninger, og den vil i princippet kunne bruges på samme måde som i eksemplet fra Krabbenhoft et al. (1990). Der er målt en værdi på -2,75 % i søen og -8,5 % i grundvandet. Desværre har vi ikke tilhørende målinger for nedbør og fordampning, men for at illustrere princippet har vi brugt de samme koncentrationer som i Krabbenhoft et al. (1990). Vi har herefter varieret indstrømningen og fundet ligevægtskon-

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

centrationen. Resultaterne for 6 forskellige indstrømningsrater er vist i nedenstående tabel.

Indstrømning af grundvand i % af nedbør	Ligevægtskoncentration af iltisotop i [%]	Opholdstid [år]
0	-14,5	4
10	-13	4
20	-12,1	5
50	-10,8	2
100	-9,9	2
200	-9,4	1

Når der ikke er nogen indstrømning af grundvand bliver ligevægtskoncentrationen -14,5 og når indstrømningen af grundvand svarer til 2 gange nedbøren bliver ligevægtskoncentrationen -9,4. Over det spænd varierer opholdstiden mellem 4 og 1 år. Den målte værdi for søen kan ikke modelleres, hvilket må skyldes, at værdierne for koncentrationerne i nedbør og fordampning ikke passer til Vedsted. Det lille beregningseksempel viser dog en målbar følsomhed i ligevægtskoncentrationen over for indstrømningen af grundvand. Baseret på det vurderer vi, at man ville kunne få et kvalificeret bud på indstrømningen, hvis vi kendte koncentrationerne i nedbør og fordampning.

Modelkørsler med linkede modeller

HydroNet modellen og tidsserie komponenten er kompatibel til OpenMI standarden. Dermed kan disse kobles dynamisk til andre OpenMI kompatible modeller eller komponenter.

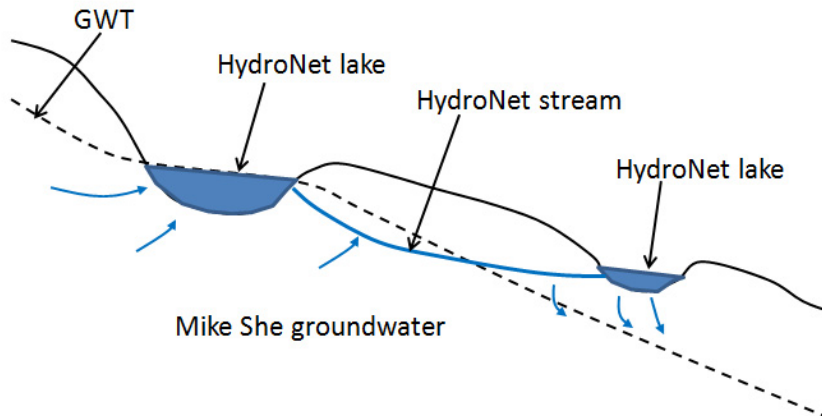
En af de mest oplagte koblinger i forbindelse med beregning af udveksling mellem overfaldevand og grundvand er en kobling mellem HydroNet og Mike She. Da begge modeller er OpenMI kompatible er en sådan kobling mulig.

For at demonstrere dette, har vi lavet en hypotetisk case med to søer, som udveksler vand med det underliggende grundvand. Overskydende vand fra den øverste sø løber via et vandløb til den nederste sø. Vandløbsstrækningen mellem de to søer udveksler også vand med grundvandet. Både søerne og grundvandet påvirkes af nedbør fra en historisk tidsserie med daglige nedbørsrater over en treårig periode. På figuren nedenfor er vist en lodret snit gennem de to søer. I basis scenariet ligger vandspejlet for den øverste sø under grundvandsspejlet, medens vandspejlet for den nederste sø ligger over grundvandsspejlet. Dette betyder, at den øverste sø modtager grundvand, medens den nederste sø dræner til grundvandet. Yderligere tænkes det, at der for begge søer, samt i en nærliggende boring, er målt klorid koncentrationer. Vandet i den øverste sø stammer dels fra grundvandsbidrag, som indeholder klorid, og fra nedbør, som ikke indeholder klorid. Den endelige klorid koncentration i søen er dermed en god indikator for fordelingen mellem grund-

Sømod

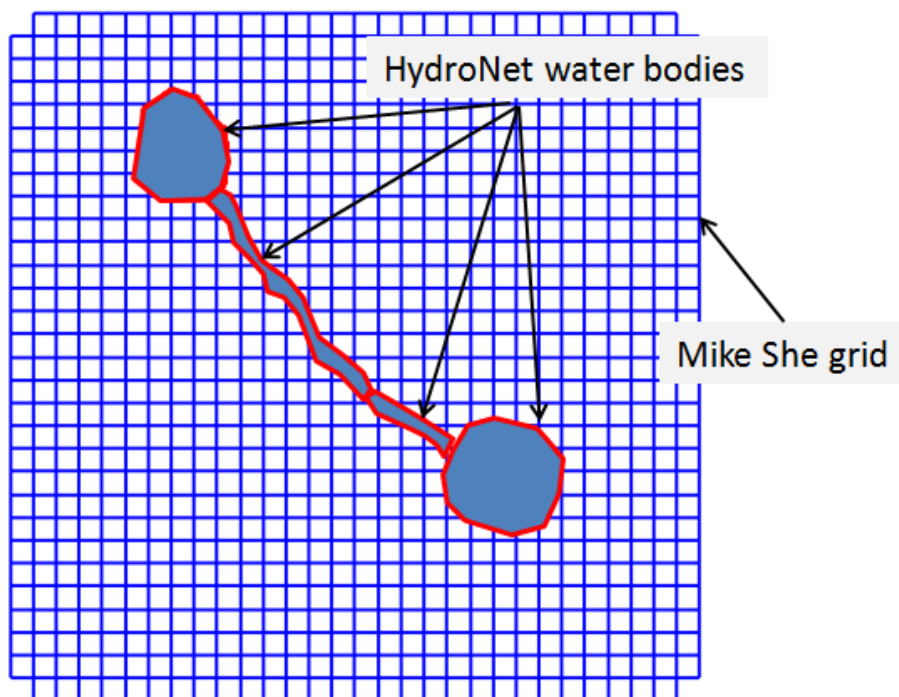
IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

vandstilstrømning og bidrag fra nedbør. For den nederste sø er princippet det samme, men her skal kloridbidraget fra vandløbet og den øverste sø også tages i regning.



Figur 32 Eksempel på OpenMI-kobling af HydroNet og Mike She.

De to søer, vandløbet og transporten af klorid modelleres med HydroNet, medens grundvandsstrømningen modelleres med Mike She. Udbredelsen af søer og vandløb er i HydroNet modellen defineret ved polygoner, medens grundvandet i Mike She er defineret i et regulært grid. (se figuren nedenfor).



Figur 33 Geometrier for HydroNet søer og vandløb, samt Mike She's grid.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

HydroNet modellen beregner grundvandsudvekslingen mellem overfladevand og grundvand, vha. Darcy's lov. Ved hvert tidsskridt modtager HydroNet information om grundvandspotentialer under hver sø og vandløb fra Mike She (via OpenMI interfacet). Grundvandspotentialerne i Mike She er defineret som en værdi for hver gridcelle, men HydroNet skal bruge en værdi for hver sø og vandløb, svarende til det gennemsnitlige grundvandspotentialer under polygonerne, som definerer disse. Yderligere anvender de to modeller ikke samme tidsskridtlængde. Derfor sker der ved dataoverførslen en række geometriske og tidslige konverteringer.

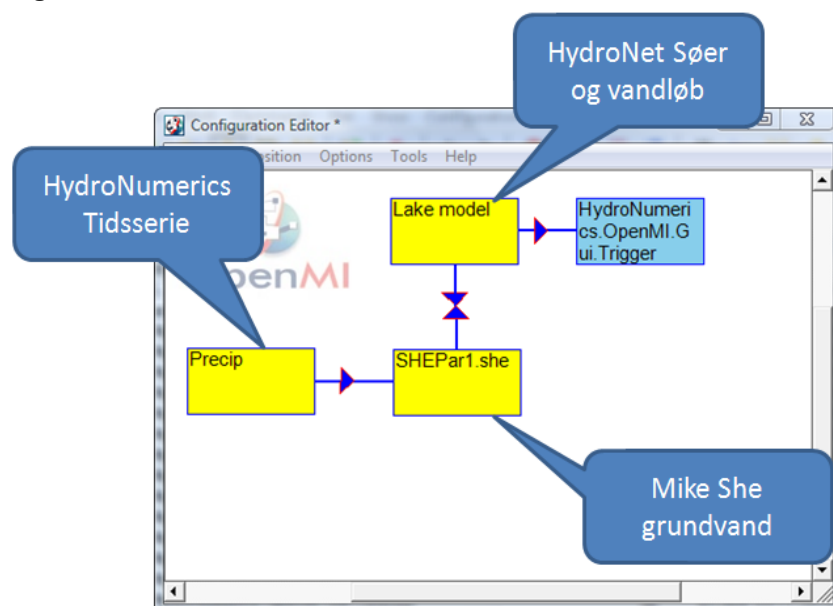
Grundvandsudvekslingen med søerne og vandløbene påvirker grundvandsstrømningen og grundvandsspejlet. Derfor skal Mike She for hvert tidsskridt bruge information fra HydroNet om dette. Her bliver data ligeledes både geometrisk og tidsligt konverteret.

Nedbørstidsserien bliver håndteret af HydroNumerics tidsseriekomponent. Derfor indgår denne som et separat komponent i systemet, hvor denne via OpenMI leverer data til Mike She.

Selvom det koblede system rent numerisk er højst kompliceret, er det en overkommelig opgave for en bruger at sætte et sådant system op.

Rent praktisk foregår koblingen (konfigureringen) og afviklingen af OpenMI systemer på følgende måde:

1. Modellerne sættes op på sædvanlig vis uafhængig af hinanden. For HydroNet modellen sker dette ved at lave en C# script, medens det for Mike she's vedkommende sker ved hjælp af dennes brugerfladen.
2. Mike she, HydroNet og tidsseriekomponenten loades i en OpenMI konfigurationseditor.



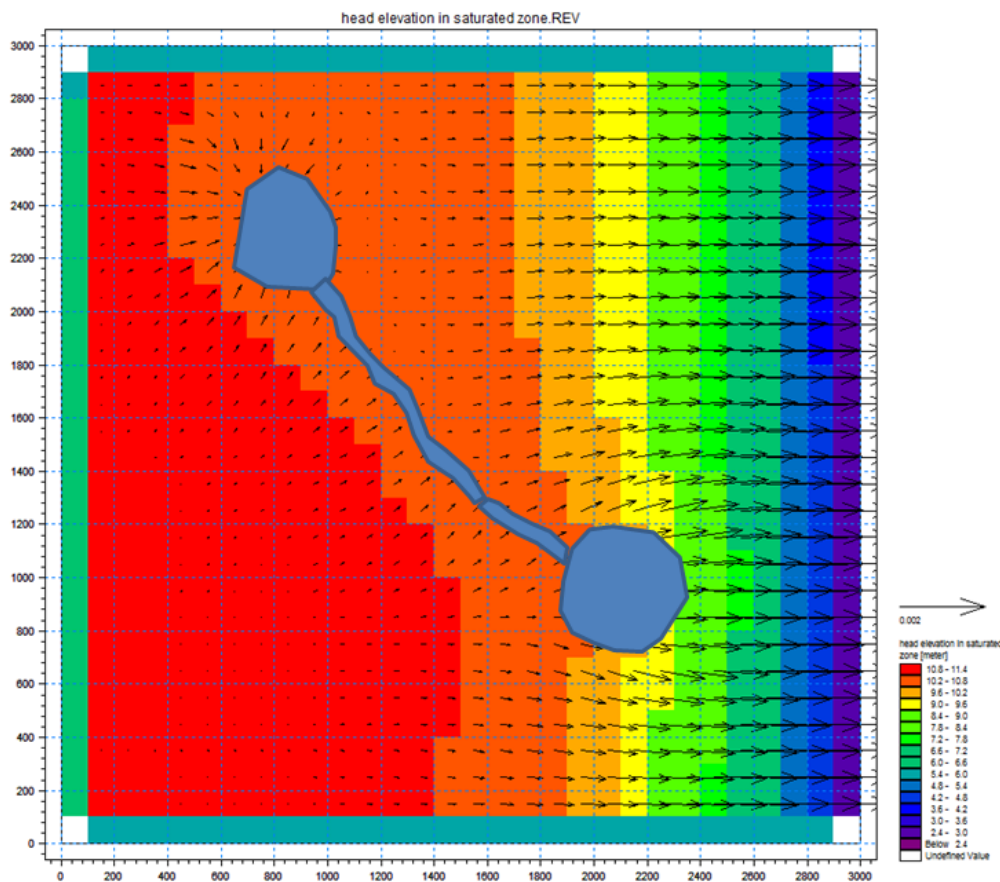
Figur 34 OpenMI-konfigureringseditor med HydroNet og MikeShe.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

3. Brugeren etablerer forbindelser mellem komponenterne. Ved efterfølgende at klikke på den enkelte forbindelse bliver brugere præsenteret for lister af datatyper, som kan leveres og modtages af de forbundne komponenter, hvorefter de ønskede kombinationer af output og input vælges.
4. Beregningen afvikles fra OpenMI editoren og brugere kan efterfølgende inspicere resultatet i modellernes output på sædvanlig vis.

På nedenstående figur ses de beregnede potentialer og strømninger for et specifikt tidspunkt i beregningsresultaterne.

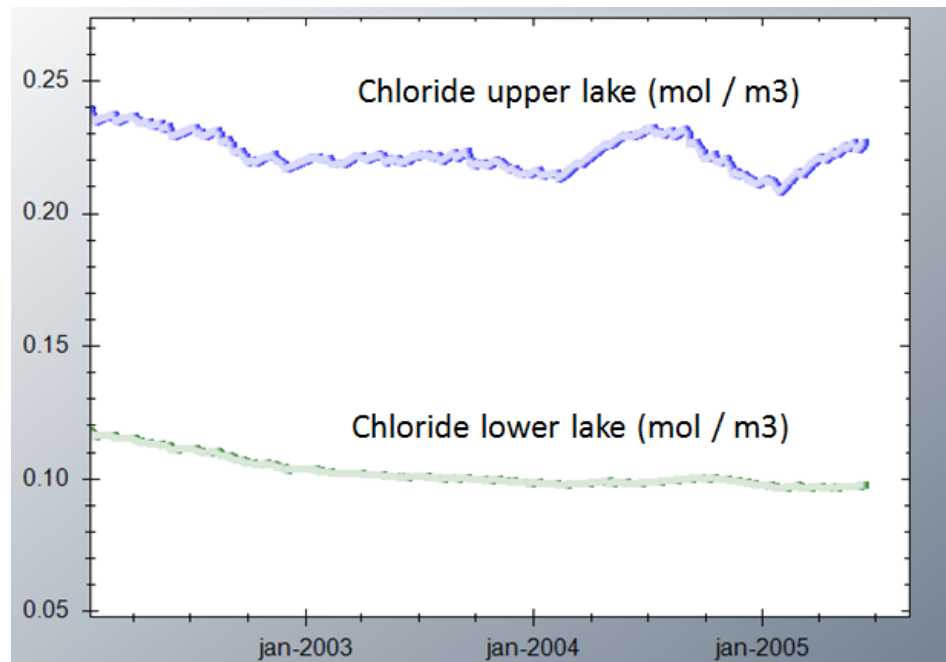


Figur 35 Beregnet flowfelt med koblet model.

Grundvandet strømmer til den øverste sø og vandløbet mellem søerne, medens den nederste sø dræner til grundvandet, hvilket ses af den forhøjede grundvandsstand ved søen. Tidsserier for den beregnede klorid koncentration i de to søer er vist på figuren nedenfor.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 36 Chlorid koncentration i de to søer.

Koncentrationen varierer som konsekvens af den varierende nedbør, idet nedbøren påvirker opblandingen i søerne og infiltrationen til grundvandet (og dermed grundvandsstanden). Koncentrationen er højst i den øverste sø, da denne modtager grundvand, medens den nedre sø kun modtager klorid via vandløbet (altså fra den øverste sø).

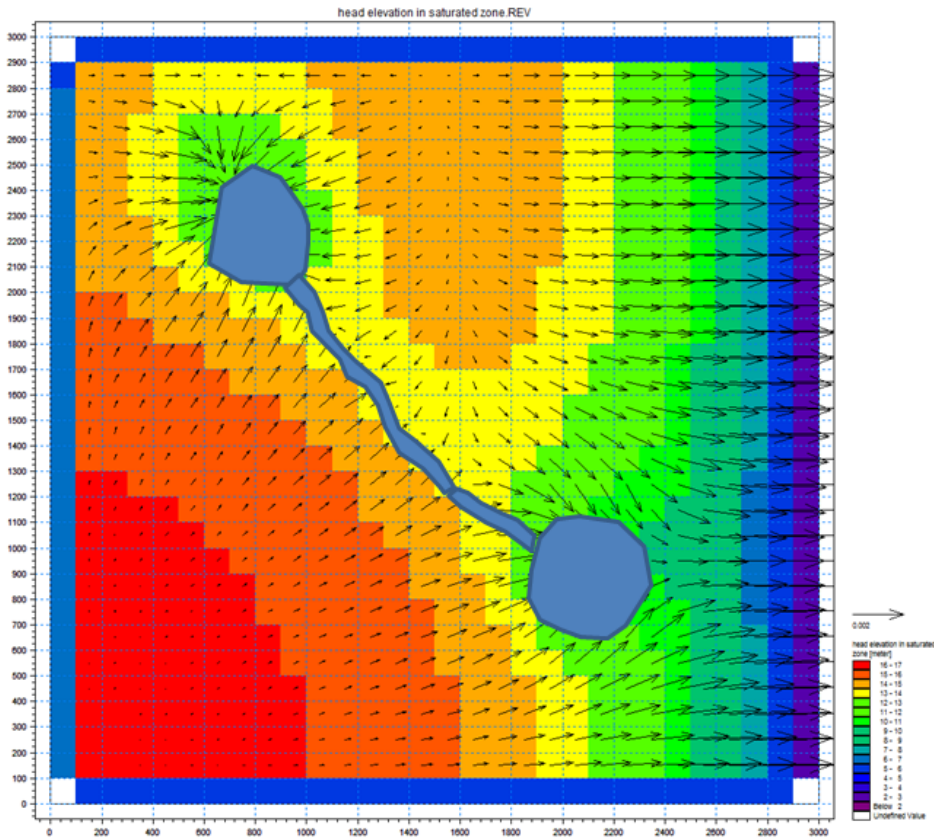
Det er klart, at man alene ud fra klorid målinger i de to søer vil kunne sige lidt om grundvandsudvekslingen (høj koncentration indikerer indstrømning af grundvand medens lav koncentration indikerer udstrømning til grundvandet). Derimod vil anvendelse af et modelsystem som præsenteret her, kunne give et kvantitativt mål for udvekslingen og dennes tidslige fordeling.

I en rigtig case vil man kalibrere hele systemet mod observerede grundvandspotentialer og de målte klorid koncentrationer. Det vil give en meget stærk kalibrering, idet grundvandspotentialerne giver øjeblikbilleder medens klorid koncentrationer indeholder information om historien (den aktuelle koncentration er konsekvensen af akkumulerede udveksling og opblanding).

Når et modelsystem som ovenstående er kalibreret, så det repræsenterer virkeligheden (passer med observationerne), kan det anvendes til at undersøge konsekvensen af diverse ændringer. På figuren nedenfor ses den ændrede grundvandsstrømning, som konsekvens af en øget nedbørsmængde.

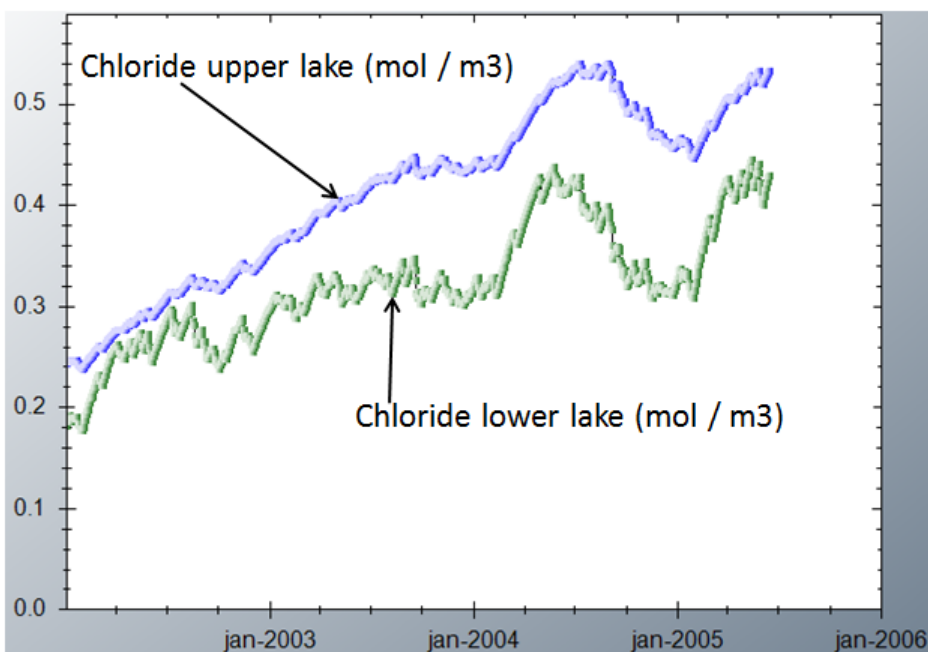
Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering



Figur 37 Beregnet flowfelt med koblet model. Øget nedbør.

Grundvandsspejlet stiger og begge søer bliver dermed modtagere af grundvand. Dette påvirker også klorid koncentrationerne, som vist på figuren nedenfor.



Figur 38 Chlorid koncentration i de to søer. Øget nedbør.

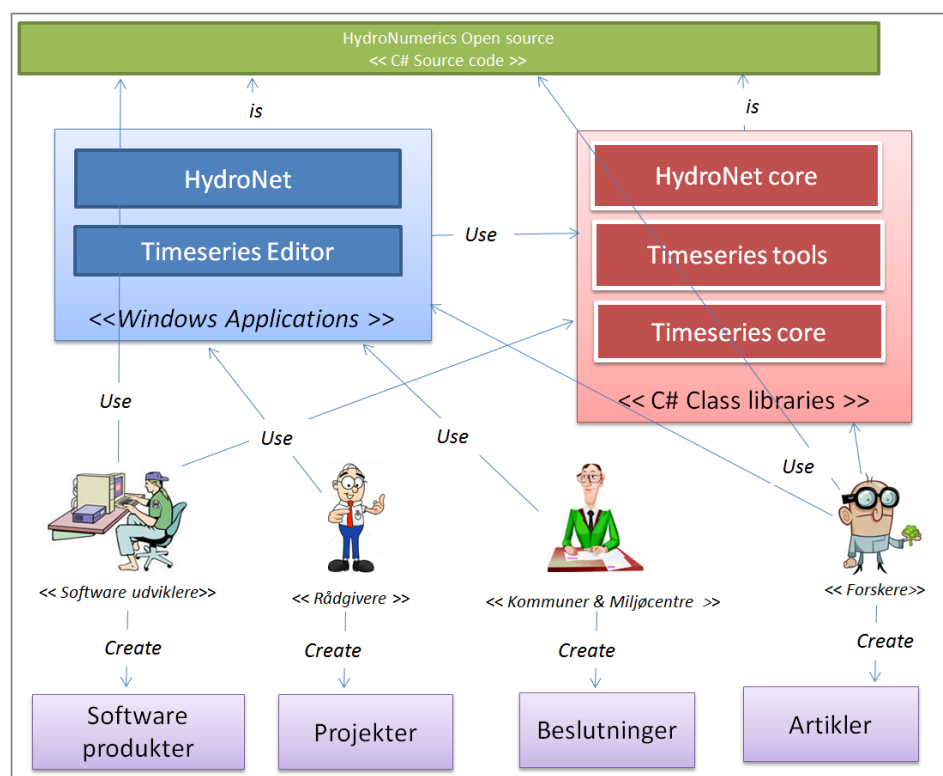
Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Anvendelse af projektets resultater

Projektets hovedformål er via udvikling af teknologier, at bidrage til, at den miljømæssige tilstand i danske søer forbedres. Projektet skaber ikke i sig selv renere søer, så opfyldelse af hovedformålet afhænger af, at andre aktører udnytter de udviklede teknologier. Det sker kun, hvis disse aktører har kendskab til teknologierne, har teknologierne til rådighed, og kan anvende dem.

De forskellige dele af projektets leverancer henvender sig til forskellige grupper. På figuren nedenfor er forbindelserne mellem leverancer og brugere illustreret.



Figur 39 Forbindelser mellem projektets leverancer og brugere.

Programkoden og kode modulerne henvender sig til software udviklere og forskere, hvorimod de færdige applikationer fortrinsvist henvender sig til rådgiverne, kommunerne og miljøcentrene.

IT-portal

Der er etableret en IT-portal under navnet "HydroNumerics". Den grundlæggende ide bag HydroNumerics portalen er at skabe et sted på internettet, som henvender sig til brugere og udviklere af open source hydrologisk software, herunder specifikt den software, som udvikles i nærværende projekt.

Portalen har tre forskellige funktionaliteter. En almindelig hjemmeside med information, et diskussionsforum og adgangen til open source kildeteksten.

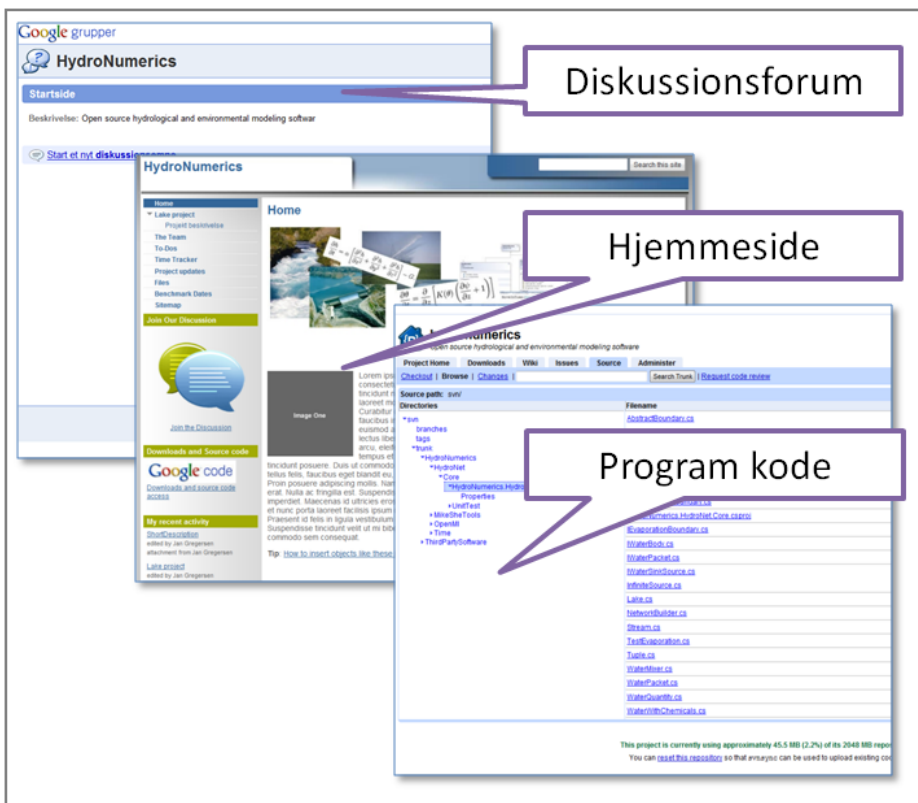
Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

For ikke at skulle gå på kompromis med de funktionelle krav har vi valgt at benytte tre forskellige services fra Google, nemlig Google Sites, Google Groups, og Google Code. Slutbrugere vil således anvende Google Sites og Google Groups, mens Google Code delen henvender sig til udviklere.

Det er dermed muligt for både udviklere og brugere ikke alene at hente information, software og kode, men også for disse at bidrage med information og kode.

Portalens adresse er: <http://sites.google.com/site/hydrumerics/>



Figur 40 Projektets IT-portal.

Sømod

IT-system til kortlægning af udveksling mellem grundvand og overfladevand vha. integreret analyse og modellering

Referencer

Gregersen, J.B., DHI – Water & Environment Denmark, P. J. A. Gijssbers WL/Delft Hydraulics The Netherlands, S. J. P. Westen WSL – Wallingford Software Ltd U.K. OpenMI: OpenMI – Open Modelling Interface. Journal of Hydroinformatics, 09.3 2007.

Hansen A. L., Wodschow I. K. H.. (2008) Undersøgelse af grundvandsstrømningen ved Vedsted Sø. Bachelorprojekt i Geografi og Geoinformatik. Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet.

Kidmose J., Grundvandsstrømning ved Hampen Sø. Center for Sørestaurering (CLEAR) et Villum Kann Rasmussen Centre of Excellence. <http://www.lake-restoration.net/>

Krabbenhøft, DP., Bowser, CJ., Anderson MP., & Valley JP. 1990: Estimating Groundwater Exchange with Lakes 1. The Stable Isotopes Mass Balance Method. Water Resources Research Vol 26, No 10.

Nielsen, Sten og Eggert Hansen, Numerical simulation of the Rainfall-Runoff Process on a daily basis. Nordic Hydrology 4, 1973, pp. 171-190.