Overvejelser om grundvandsindsivningen til Vængsø

En foreløbig undersøgelse

Bertel Nilsson, Peter Engesgaard, Jacob Kidmose, Mette Frandsen, Frank Landkildehus, Erik Jeppesen & Martin Søndergaard

ERIET

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND, KLIMA- OG ENERGIMINISTERIET

Overvejelser om grundvandsindsivningen til Vængsø

En foreløbig undersøgelse

Bertel Nilsson¹, Peter Engesgaard², Jacob Kidmose², Mette Frandsen², Frank Landkildehus³, Erik Jeppesen³ & Martin Søndergaard³

¹ De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) ² Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet (IGG) ³ Danmarks Miljøundersøgelser, Silkeborg, Århus Universitet (DMU)



Indhold

Sammenfatning	5
English summary	6
Introduktion	7
Anvendte metoder	8
Geologisk ramme Hydrogeologiske forhold Indstrømning af grundvand til søen Vandkvalitet	
Dataanalyse	13
Geologisk ramme Hydrogeologisk ramme Grundvandsudveksling med Vængsø Grundvandskemi	13 18 19 26
Vængsø 2D model	27
Sammenligning af metoder til bestemmelse af grundvandsbidrag	30
Grundvandsbidrag fra vestsiden af søen Vandbalance	30 30
Planer om videreundersøgelser	33
Referencer	34
Bilag	35

Sammenfatning

En foreløbig undersøgelse af Vængsø med hydrogeologiske metoder udviklet og testet under CLEAR projektet (www.lake-restoration.dk) viser, at søens vandbalance og sandsynligvis også vandkvaliteten (særlig total fosfor) i meget høj grad er styret af det omgivende grundvandsmagasin. Vores undersøgelse bekræfter, at opholdstiden i søen er meget kort (2-4 uger), så delta O18 signalet i søvandet svarer til, hvad der er i grundvand. Med andre ord sker udskiftningen af søvandet i Vængsø med en sådan hastighed, at fordampningsprocessen ikke når at få nogen effekt på delta O18 forholdet. I piezometerrør placeret systematisk i søkanten måles fosforindhold på mellem 20 og 220 mikrogram/l (gennemsnit 90 mikrogram pr. liter). Vi kender ikke grundvandsfluxen ved de enkelte prøvetagningspunkter og kan derfor ikke angive den vandfluxvægtede gennemsnitlige koncentration af fosfor. Men vi ved med sikkerhed, at grundvandet står lige uden for søen og presser på for at sive ind enten via søens vestlige og østlige siders ripariske zoner eller i kilder langs østsiden i søbunden. Der skal udføres en bedre kvantitativ opgørelse af massefluxen af fosfor via de ripariske zoner og kildevæld. Det naturligt forekommende fosforindhold i det omgivende grundvand kan være så højt, at det er usikkert, hvorvidt den positive effekt af en restaurering ved indgreb i fiskebestanden vil kunne fastholdes på lang sigt uden periodisk opfølgende reduktion i bestanden af skalle og brasen.

English summary

A preliminary study of Vængsø with hydrogeological approaches developed and tested in the CLEAR project (www.lake-restoration.dk) demonstrates that the lake's water balance and probably also water quality (especially total phosphorus) to a large degree are driven by the surrounding aquifer. Our study confirms that the residence time in the lake is very short (2-4 weeks) as the delta O18 signal in the lake water is equivalent to that is in the groundwater. In other words, the replacement of seawater in Vængsø is so quick that evaporation has no effect on the delta O18 relationship. In piezometer tubes placed systematically in the lake bank measured phosphorus content of between 20 and 220 micrograms per litre (average 90 micrograms per litre). We do not know the groundwater flux at each sampling points and thus we cannot estimate the water flux weighted concentration of phosphorus. But we do know that the groundwater is just outside the lake pushing to leak into the lake either through the western or eastern sides of the riparian zones or springs along the east side of the bottom of the lake. A better quantitative estimate on the mass flux of phosphorus through the riparian zones and springs must be carried out, seen in combination with the dynamic water level changes in the lake and the periodic flooding of the riparian zones. The naturally occurring phosphorus in the surrounding groundwater might be is so high that it is uncertain whether the positive effect of lake restoration with fish removals will have a continuous effect without periodic follow-up reduction in the population of roach and bream.

Introduktion

Nærværende rapport er en foreløbig rapportering af hydrogeologiske undersøgelser udført i Vængsø beliggende ca. 15 km sydøst for Silkeborg (Fig. 1). Undersøgelserne er udført i et samarbejde mellem Institut for Geografi og Geologi (KU), GEUS, og DMU-Silkeborg (AU), og omfatter feltkampagner i perioden marts 2009 til januar 2010. Det overordnede formål har været at få en afklaring af hvor i søens vandbalance, vi skal sætte ind med mere detaljerede undersøgelser i den kommende tid. Nærværende undersøgelse har desuden haft fokus på identificering af mængde og kvalitet af grundvandsindsivning langs søens østlige og vestlige sider.

Specifikke formål med de indledende undersøgelser ved Vængsø kan listes som følger:

- at vurdere de hydrogeologiske forhold ved søen i relation til det omgivende grundvandsmagasin. Speciel opmærksomhed vil være rettet mod de betydelige råstofgrave (kvartssand), der er i produktion vest for Vængsø
- at præsentere en konceptuel hydrogeologisk forståelsesmodel for Vængsø og dens opland
- at vurdere den overordnede vandbalance og opholdstid i søen, samt identificere videnshuller i vandbalancen, hvor de opfølgende undersøgelser skal sættes ind
- at vurdere vandkvaliteten (særlig total P) i søen i relation til det omgivende grundvandsmagasin

Deltagerne i undersøgelsen er

- Jacob Kidmose, Peter Engesgaard og Mette Frandsen (Institut for Geografi og Geologi, KU)
- Bertel Nilsson og Per Jensen (Hydrologisk afdeling, GEUS)
- Frank Landkildehus, Erik Jeppesen, Martin Søndergård og Tommy Silberg (DMU, Silkeborg, AU)



Figur 1. Beliggenhed af Vængsø lige vest for Gudenåen

Anvendte metoder

Geologisk ramme

Vængsø er beliggende i et kuperet landskab øst for hovedopholdslinien i en nordsydgående dal omgivet af kvartære ekstramarginale aflejringer af smeltevandsler (Fig. 2). Umiddelbart under istidsaflejringerne kommer tertiære miocæne sandaflejringer (prækvartæroverfladen). der umiddelbart vest for søen (ved Addit) udnyttes til en omfattende råstofgravning af kvartssand (Dybkjær og Rasmussen, 2006). I hydrogeologisk henseende udgør det miocæne sand og glaciale smeltevandssand det regionale grundvandsmagasin for Vængsø området. Den overfladiske afstrømning fra søen finder sted gennem det sydlige afløb, der kort efter drejer østover mod Gudenåen.



Figur 2 (Venstre) Digital højdemodel med Vængsø vist i kote +26,2. (Højre) Prækvartæroverfladen ved Vængsø

Jordartskortet for Vængsøområdet er vist i figur 3. Vængsø og de nordfor beliggende mindre søer (Blidsø, Rødesø og Oversø) er alle ifølge jordsartskortet beliggende i ferskvandsaflejringer omgivet af extramarginale sedimenter (smeltevandssand). Af jordsartskortet ses endvidere tydeligt den nord-sydgående dalstruktur, hvori Vængsø er beliggende parallelt med Gudenå-dalen mod øst. De geologiske forhold er som ved de fleste danske søer imidlertid stærkt mangelfuldt beskrevet grundet meget få boringsoplysninger i det sønære område. En mere detaljeret beskrivelse af den geologiske ramme omkring og under søen er derfor udført for at få søen lagt i en forbedret geologisk ramme, som vi har opnået ved sammenstilling af eksisterende og i dette projekt genererede geologiske/geofysiske data.



Figur 3. Jordartskortet 1:200.000

Geologi omkring søen

MEP metoden (Multi Elektrode Profilering) er en geoelektrisk profileringsmetode, som er baseret på, at forskellige bjergartstyper har variationer i elektrisk ledningsevne og dermed også forskellige modstande (Geofysiksamarbejdet, 2005). Typiske modstande er:

- Moræneler (30-80 Ohmm),
- sand over grundvandsspejl (GVS) (>200 Ohmm) og
- sand under GVS (100-500 Ohmm).

Modstanden måles som spændingsforskellen mellem potentialspyd. De tre opmålte MEP profiler (Wenner-opstilling) er alle opmålt ved et udlæg af kabler over en 350 m strækning. Yderligere er profilet øst for søen opmålt med dipol-dipol konfiguration. Langs udlægget er placeret elektroder (spyd) med en indbyrdes afstand på 5 meter. Der er udsendt en spænding mellem strømspydene på 400mV-2000mV. Profilerne er tolket med inversionsprogrammet Res2Dinv efter retningslinjer beskrevet i Geofysiksamarbejdet (2008). Det anvendte MEP udstyr er af mærket SYSCAL PRO.

Der er udført følgende:

- Opmåling af 3 MEP land-profiler: nord-syd profil øst for søen; øst-vest profil nord for søen og øst-vest profil vest for søen, se figur 6. MEP profilet vest for søen er af tekniske grunde ikke lykkedes og udelades derfor af den videre analyse.
- Processering (inversion) og fortolkning af MEP data
- MEP profilerne sammentolkes med geologiske profiler nær MEP linierne fra JUPI-TER boringsdatabasen (www.geus.dk/jupiter/index-dk.htm).

Geologi under søen

Fordeling af lavpermeable organiske sedimenter på søbunden er forsøgt kortlagt ved

- etablering er piezometerrør langs søbredden og
- sejlture med georadar udstyr (GPR) af typen PulseEkko Pro System i gummibåd på søen.

Georadarundersøgelsen er foretaget med 100 Mhz antenner fastgjort i bunden af en special fremstillet 1x1 m fladbundet flåde. Bunden af flåden bestod af en plastikarmeret presenning spændt ud omkring en træramme uden brug af metaldele for at undgå interferens med georadarudstyret. Modsat konventionel landbaseret GPR, hvor linien opmåles af en triptæller og denne udløser målingerne, var en GPS forbundet til georadar udstyret. Flåden med GPR-udstyret blev trukket af en gummibåd, hvori udstyr til dataopsamling var installeret (Fig. 4).

Der er udført følgende:

- Opmåling af 8 georadarprofiler fra gummibåd på kryds og tværs i den centrale og sydlige ende af søen
- Processering og tolkning af georadardata
- Sammentolkning af georadarprofilerne med geologiske profiler udført som støttepunkter til bestemmelse af det organiske sediments tykkelse.





Figur 4. Kortlægning af geologi under søbunden ved at sejle med georadar udstyr (GPR) af typen PulseEkko Pro System i gummibåd på søen.

Hydrogeologiske forhold

Grundvandsspejlets placering og hældning i det underliggende grundvandsmagasin er kortlagt ved etablering af pejleboringer i det regionale sandmagasin i området omkring Vængsø. Desuden er de hydrauliske gradienter blevet bestemt i og nær søbredden på enkelte stationer, så eventuelle ind- og udstrømningsområder kan lokaliseres.

Der er udført følgende:

- Et udvalg af tilgængelige boringer med filtersætning i det regionale grundvandsmagasin, med en afstand på op til 2 km fra søen, er blevet pejlet til udarbejdelse af et potentialkort for det omkringliggende grundvandsmagasin (Bilag 1).
- Der er etableret i alt 19 piezometerrør, hvor v1-18 er installeret langs søkanten rundt om Vængsø og et enkelt rør (v19) er etableret umiddelbart ved siden af DMU's målestationen midt på søen (Fig. 5). Heraf er 3 transekter med 3 piezometre i hver etableret, pejlet og prøvetaget langs søbredden. Transekternes længde vinkelret på søen er ca. 25-30 m.

Alle lokale og regionale boringer, der indgår i undersøgelsen, er så vidt muligt indmålt med GPS udstyr af typen Trimple R8. På enkelte lokaliteter tillod skyggende træer ikke brugen af GPS. Disse er i stedet indmålt ved traditionelt nivellement med TOPCON udstyr.



Figur 5. Placering af piezometerrørene v1-v19. Yderligere er 2 tilløb mod nord, Møllebæk mod syd, samt bathymetrien (bundtopografien) af søen vist.

Indstrømning af grundvand til søen

Til bestemmelse af grundvandsindstrømningen (seepage) er følgende tre metoder anvendt: (a) seepagemeter, (b) temperatur profiler, (c) Darcymetoden (inkl. Slug tests) og (d) iltisotoper. Alle fire metoder er indgående forklaret og beskrevet i Nilsson et al (2007) og Engesgaard et al (2009).

Der er udført følgende:

- Seepagemeter målinger er udført langs de to transekter V7 og V12 med i alt 11 målinger. I januar 2010 hvor søen var isdækket er seepage målt i våger (grundvandskilder) mellem v7 og v11 på østsiden af søen
- Temperaturprofiler er målt i flere afstande fra søbredden ved v7 og v12
- Hydrauliske trykniveauer målt i enkeltstående piezometre samt i transekter ved 2 pejlerunder. Slugtest er udført i piezometerrør i v7 og v12 transekterne, så en grundvandsfluks ved "transekt-metoden" kan bestemmes.

Vandkvalitet

Efter renpumpning svarende til 3-5 rørvolumener er samlige piezometerrør prøvetaget langs søbredden til vandprøver til bestemmelse af N og P. Desuden er udtaget prøver til bestemmelse af iltisotoper.

Der er udført følgende:

- Udtagning af vandprøver til bestemmelse af vandkemi i 18 piezometerrør og 2 tilløb (5 prøvetagninger fra april til oktober 2009). Analyserne udført af DMU-Silkeborg.
- Udtagning af vandprøver til bestemmelse af iltisotoper i 17 piezometerrør, i 2 basiner og en boring vest for søen, samt i tilløb og i selve søen (marts 2009). Analyserne udført af Institut for Geografi og Geologi (KU).

Dataanalyse

Geologisk ramme

Lokale forhold omkring søen

De lokale geologiske forhold ved Vængsø er blevet undersøgt med de to geofysiske metoder MEP langs søen og georadar på søen. De geofysiske opmålinger er så vidt muligt blevet sammentolket med konkrete boringsoplysninger nær profilerne, så fortolkningsrummet er snævret mest muligt ind.

Tolkningen af MEP profilerne er baseret på geofysiksamarbejdets målinger af den elektriske modstand i typiske danske sedimenter (Skov- og Naturstyrelsen, 1987; Geofysiksamarbejdet, 2005). Typiske modstande er:

- moræneler (30-80 Ohmm),
- umættet smeltevandssand (> 200 Ohmm),
- smeltevandssand under grundvandsspejlet (100-500 Ohmm),
- miocænt glimmerler (10-40 Ohmm), samt
- miocænt kvartssand, der formodes at have en højere resistivitet end smeltevandssand grundet den homogene mineralogi.

MEP profillinierne 1a, 1b og linie 2 blev opmålt som vist i figur 6. Profilerne 1a og 2 har begge en nedtrængningsdybde på ca. 60 meter, mens profil 1b har en nedtrængningsdybde på ca. 15 meter, men med en større nøjagtighed end de to øvrige profiler. Profilerne 1a og 2 er begge opmålt med Wenner opstilling, mens profil 1b er opmålt med dipol-dipol konfiguration. Alle tre profiler har en root mean square fejl på 7-7,5%, hvilket er fuldt acceptabelt og tyder på relativ små måleusikkerheder.

Profilerne 1a og 1b er begge udført på et rimelig fladt terræn, så begge de opmålte profiler antages at afspejle de underliggende geologiske aflejringsforhold samt dybden til grund-vandsspejl. Profil 1a viser meget høje elektriske modstandsværdier indtil en dybde på ca. 25-30 meter. Værdierne er så høje, at de langt overstiger typiske modstandsværdier for dansk smeltevandssand. Dette tolkes som umættet sand til 15-17 meter under terræn (jf. grundvandsstand i boring DGU nr. 97.925 nord for MEP linien). Under ca. 30 meter optræder en god elektrisk leder, der tolkes at være glimmerler (jf. DGUnr. 97.925).

Profil 1b viser, at højmodstandslaget kiler ud mod syd. Boring DGU nr. 97.748 placeret 200-300m syd for profilliniens sydlige ende viser god overensstemmelse med forekomsten af smeltevandssand til mindst 20 meters dybde. Nord for profillinie 1a og 1b udviser boring DGU nr. 97.925, en noget anderledes geologi fra MEP profil 1a og 1b's, idet denne boring viser ca. 15 meter umættet smeltevandssand og glimmerler fra 15 til mindst 40 meters dybde. Det kan ikke udelukkes, at dybden til overfladen af lerlaget mellem profillinie 1a og 1b og boring DGU nr. 97. 925 varierer ganske betydeligt på denne korte afstand.

Profil 2 er opmålt på tværs af det nord-syd gående dalsystem med betydelige topografiske forskelle – den højeste topografi ses i østenden af profil 2. Profilet viser overordnet en heterogen geologi med lave modstande mod vest og høje modstande i øst fra 0-15 meters dybde. De lave værdier mod vest tolkes dels som sump/mose aflejringer (vandmættede) og dels lerede aflejringer. Desuden forekommer indslag af sandede aflejringer (smeltevandssand), og specielt hvor profillinien skærer nær søens nordlige bred optræder ifølge modstandsfordelingen et sandet vindue fra 40 meters dybde op til terræn. Der er ingen boringer i vestenden af profilet, som tolkningen kan korreleres med. I den østlige ende af profilet ses mellem 0-15 meters dybde meget høje modstandsværdier, der tolkes som sand over grundvandsspejlet. Yderligere ses et lavmodstandslag fra 15-25 meter, der igen er underlejret af et sandlag. Der er fin korrelation til geologien, som er kendt i boring DGU nr. 97.925 og profil 2's østlige ende. Det skal understreges, at ingen af MEP profilerne er rettet op i forhold til topografieffekter. Specielt profil 2 er påvirket af dette da det ligger på tværs af en stærkt skrånende ådalsskrænt.

Vi ved fra firmaet DANSANDs grusgrav vest for Vængsø, at miocænt kvartssand er relativt højtliggende i Vængsø-området. Hvorvidt de høje modstandsmålinger skyldes højtliggende kvartssandsaflejringer er ukendt, da kun ganske få boreoplysninger foreligger og den regionale geologi er ganske variabel i området med dybt nedskårne smeltevandsdale i relativt horisontalt lejrede miocæne sand-, ler- og brunkulslag. Den fortolkning med de højtliggende kvartssandslag vil dog ikke passe særlig godt med den dybdemæssige beliggenhed af prækvartæroverfladen, som angivet i figur 2.





Figur 6. MEP profiler. Line 1 (øst) = MEP profil 1a & 1b; Line 2 (nord) = MEP profil 2. Profilerne 1a og 2 er udført som Wenner opstillinger, mens der ved profil 1b er brugt dipol-dipol. Profilerne 1a og 1b er således opmålt ved samme udlæg af elektroder resulterende i forskellig vertikal og horisontal opløsning af data. Bemærk at ingen af profilerne er korrigeret i forhold til topografi. Dette har specielt effekt i profil 2 's østlige ende.

Lokale forhold under søen

Georadar målinger (GPR) er udført fra gummibåd som vist i figur 4 og langs de på figur 7 viste sejlruter/profiler. Tolkningen er i første omgang baseret på den simple antagelse, at GPR signalets rejsetid (traveltime) gennem sedimentet svarer til rent vand, svarende til 0,033 ns/m. Denne værdi benyttes til dybdeskalering af profilerne, men hvis flere boringsoplysninger om den organiske sediments tykkelse bliver tilvejebragt, kan en mere korrekt rejsetid bestemmes for de øvrige profiler. For nuværende kendes tykkelsen af det organiske sediment fra etableringen af samtlige piezometre langs søens bred samt i en enkelt boring (v19) midt i søens sydlige ende ved DMU's måleplatform.

Geometrien af de organiske søsedimenter kan tolkes ud fra af de opmålte GPR profiler: Profil 25 og 28 (Fig. 7). De øvrige GPR profiler er vist i bilag 5, men disse mangler supplerende boringer udført langs sejllinierne, før en meningsfuld fortolkning af laggrænser mellem organisk sediment og omgivende sandet grundvandsmagasin kan udføres.

Profil 25 er udført langs en linie hvor tykkelsen af det organiske sediment kan korreleres til to boringer. Ved den vestlige grænse af profil 25 ses af boreoplysningerne (v4), at der findes ca. 3,75 m organisk sediment. Georadarmålingerne udført ved boringen antyder, at reflektoren fra det underliggende sandlag findes i 4 meters dybde under vandoverfladen, hvilket er i overensstemmende med boringen. Der må dog tages forbehold for den ukendte rejsetid ned igennem det organiske sediment. De øvre reflektorer for det organiske sediment i den vestlige del af profil 25 er forstyrret, hvilket kan skyldes, at egentlig lagdelt sedimentation ikke finder sted i denne del af søen grundet lav vanddybde og højt energiniveau. Centralt i profilet korreleres til boring v19 (midt i søen) med en tykkelse af det organiske sediment på ca. 8m. Energiniveauet i den vestlige og vindpåvirkede del af søen bevirker, at finpartikulær sedimentation ikke finder sted før 20-25 meter fra strandkanten.

Profil 28 viser samme situation som profil 25, men her er der næsten fuld penetration til det underliggende sandlag, også i den mellemste del af profilet. Som ved profil 25 ses i den vestlige del af profil 28, at det organiske lag tynder ud til kun ca. 2 - 2,5 meters tykkelse. Generelt viser georadarprofilerne, hvordan søen som et sedimentært bassin er blevet fyldt op af organiske søsedimenter, og fra at være mere end 6 meter dyb (profil 28) er søen nu kun op til 2 meter dyb. Ved boring v16 er der målt 8,8 m organisk materiale, og hvis søen formodes dannet efter tilbagetrækning af det sidste isfremstød, giver det en sedimentations rata på 0,8-1,0 mm/år.

Ved at kombinere den geologiske fortolkning af MEP og GPR profilerne tolkes det som meget sandsynligt, at søen generelt er omgivet af en organisk søaflejring med lav permeabilitet. Østbredden er dog mest sandet indtil 5-25 meters afstand fra søbredden, mens hele den øvrige bredzone består af mellem 0,5 og knap 9 meters tykke organiske aflejringer (Fig. 7). Yderligere står det klart, at de tilstødende sedimenter nord og syd for søen er noget forskellige, idet der syd for søen er sandede aflejringer af betydelig mægtighed, mens der i den nordlige ende ses en mere kompleks geologi præget af sump/mose aflejringer og sandsynligvis lerede aflejringer med vinduer af sand til overfladen.



Figur 7. Venstre: GPR profiler i Vængsø (profillinie nummer 23-30). Højre: Tykkelsen af organiske aflejringer og søens bathymetri, begge angivet i meter.



Figur 8. GPR profil 25 og 28 er vist på figuren. Rejsetiden i rent vand (v=0,033m/s) er benyttet til beregning af dybdeaksen på de tre GPR profiler. Området mellem de røde linier angiver udbredelsen af de tolkede organiske søsedimenter.

Hydrogeologisk ramme

Regionale hydrogeologiske forhold

For at belyse placering og hældning af grundvandsspeilet i det regionale grundvandsmagasin, er der udført en pejlerunde af vandspejlet i boringer og søer i oplandet til Vængsø. Potentialekortet repræsenterer en blanding af trykniveauer i boringer filtersat i miocænt sand, i smeltevandssand og søvandspejlet i søer i området, hvor det antages for sidstnævnte, at de er i helt eller delvis hydraulisk kontakt med det regionale grundvandsmagasin. Yderligere antages det, at miocænt sand og smeltevandssand i området udgør et sammenhængende grundvandsmagasin. Potentialekortet indikerer hældende grundvandsspejl fra vest mod øst (Fig. 9 og bilag 1). De hydrauliske gradienter er meget høje vest for søen, i størrelsesordenen 10-12 promille. Grundvandet mellem søen og grusgravene (Dansand og Marielund) er afsænket betydeligt ved oppumpning af hensyn til råstofgravningen (Fig. 10). Noget tyder på, at vandspejlet i Vængsø kun er beliggende ca. 0,5 meter lavere end det afsænkede vandspeil i afsænkningsboringerne i råstofgravene, hvilket efter vores bedste vurdering bør afklares ved en mere indgående detail-undersøgelse. En yderligere afsænkning med 0,5-1 meter vest for søen vil dermed potentielt kunne sænke vandspejlet i Vængsø. Alternativt risikeres det at størrelsen af grundvandsbidraget til søen mindskes, hvilket resulterer i en forøget opholdstid i søen og dermed mindsket udvaskning af fosfor fra bundsedimenterne som resultat. Derved forlænges tidshorisonten for udvaskning af næringsstof fra søsedimentet til vandfasen sandsynligvis yderligere.



Figur 9. Kort over grundvandets trykniveau i det regionale grundvandsmagasin ved Vængsø. Afstand A-A': 1,4 km



Figur 10. Konceptuel hydrogeologisk forståelsesmodel opstillet langs linien A-A' i figur 9 gennem Vængsø området. Boringssignatur: Orange = ler (glimmerler); Lysgul = sand (mio-cænt sand og smeltevandssand).

Grundvandsudveksling med Vængsø

Lokale gradientforhold

Trykniveauet i samtlige piezometre etableret i søkanten rundt om søen viser alle et højere trykniveau relativt til søens vandspejl (Fig. 11). Trykniveauet er højest i den nordlige og vestlige side af søen (0,5-1,0m over søens vandspejl). Den østlige og sydlige side viser trykniveauer mellem 0,01-0,5 m over søens vandspejl. Forskellen i trykniveau kan alene forklares ved forekomsten af en betydelig tykkere pakke af organiske sedimenter i vest/nordenden af søen, mens østsiden er i direkte kontakt med det omgivende grund-vandsmagasin. Dette betyder således, at grundvand vil strømme til søen, såfremt der er hydraulisk kontakt mellem det omgivende grundvandsmagasin og søen. Det er vigtigt at bemærke, at grundvandsfluxen ved de 18 piezometerrør (v1-v18) ikke på baggrund af de foreliggende undersøgelser kan kvantificeres, hvorfor det ikke er muligt at beregne massefluxen af total P til søen for indeværende. De kommende undersøgelser vil rettes mod at få kvantificeret den totale P-stofflux fra det omgivende grundvandsmagasin til søen. Af bilag 2 fremgår oplysninger om nivellement, boringsgeometri og pejledata.



Figur 11. Trykniveau i piezometre langs bredzonen. Alle målinger er udført 3-4m fra søbredden ved 0,5-1m vanddybde. Blå angiver tryk højere end søens vandspejl, mens rød angiver det modsatte. *Bemærk: Ingen udstrømning af søvand til det omgivende grundvand er observeret rundt om søen.*

Transektmetoden (Darcy)

Darcy-fluxen (q_D) beregnes ved de to transekter på østbredden som funktion af hydraulisk gradient (bilag 2) og beregnet horisontal hydraulisk ledningsevne ved slugtest i piezometrene v7 og v12 (Tabel 1). Darcy-fluxen er beregnet for hhv. den vertikale gradient ved v7 og v12, samt den horisontale hydrauliske gradient i transekterne ved v7 og v12. Som det fremgår af tabel 2, varierer resultaterne betydeligt,, afhængig af hvilken gradient der anvendes. En yderligere komplicerende faktor er knyttet til anisotropiforholdet mellem den horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne ved søens østbred. Den anvendte K-værdi fra slug tests repræsenterer den horisontale hydrauliske ledningsevne. Vi ved imid-lertid fra indstrømningszonen på østsiden, at ledningsevnen er domineret af den vertikale komponent. Vi vil i en senere fase af projektet udføre en hydraulisk test, der primært måler den vertikale hydrauliske ledningsevne.

Tabel 1. Horisontal hydraulisk ledningsevne beregnet fra slugtests udført i juli 2009. I hvert
piezometerrør er udført 3 slugtests og alle slugtest er udført som falling head målinger.
Piezometer v8 er sandsynligvis tilklogget, hvorfor der er kun udført en enkelt slugtest i den-
ne

	AVG	STD	AVG	STD	N, number of
	m/sek	m/sek	cm/dag	cm/dag	tests
V7	1,20E-04	3,0E-05	10,4	2,6	3
V8	6,03E-06	-	0,5	-	1
V9	4,44E-04	1,7E-04	38,4	14,7	3
V12	1,26E-04	5,3E-05	10,9	4,6	3
V17	4,48E-04	3,1E-05	38,7	2,7	3
V18	4,97E-04	5,6E-05	42,9	4,8	3

Tabel 2. Darcyflux (q_D) beregning ved transekterne v7 og v12.

	v7	v12
Vertikal hydraulisk gradient ¹	0,026	0,57
Horisontale hydrauliske gradient ²	0,054	0,003
K(slugtest) m/s	1,20e-04	1,26e-04
q _D cm/day ¹	26,9	619,4
q _D cm/day ²	55,8	3,3

Seepagemeter

Seepagemeter-målinger er udført i to afstande fra søbredden udfor de to transekter på østsiden af søen ved v7 og ved v12. De gennemsnitlige seepage-rater og antallet af målinger er vist i tabel 3. Resultaterne viser stor variation mellem de to lokaliteter, mens der ikke er så stor forskel mellem målinger foretaget 0,5-1 m fra bredden eller 2,5 m fra bredden. Ved v7 transektet måles grundvandsbidraget til 0,3-0,5 cm/d i gennemsnit, mens der ved transekt v12 i gennemsnit strømmer 14-16 cm/d til søen fra grundvandszonen.

			eg : := (ea =eeee):
Seepagemeter	Avg q, cm/dag	m/yr	n, number of tests
V7 – 0,5m	0,3	1,1	1
V7 - 2,5m	0,5	1,8	1
V12 - 1m (1*)	16,1	59	5
V12 - 2,5m (2#)	14,0	51	3

Tabel 3. Seepagemeter-rater (q_{seep}) ved transekterne v7 og v12 (Juli 2009).

Søen blev besøgt i starten af januar 2010, hvor den var delvis isdækket efter 3-4 ugers kuldeperiode. Ved en inspektion af søens østlige og vestlige side var det tydeligt, at grundvandstilstrømningen langs de to sider må være helt forskellig. Ved vestsiden ses en bred, åben vandoverflade, der vurderes at være isfri på grund af en overfladisk afstrømning i bredzonen, hvor grundvand tvinges ud i terræn og siver frem mod søens vandoverflade over en bred front (Fig. 12, nederst tv.). Derved holdes vestsiden af søen isfri i selv en længere kuldeperiode.

I den østlige del af søen kan der generelt ikke observeres nogen særlig smeltning. Mellem piezometerrørene v7 og v11 ses cirkulære våger i et afgrænset område. Yderligere trykkes

grundvand op i randzonens skræntfod. Isen er i en op til 0,5m bred zone opsmeltet langs søkanten, dog ikke i samme omfang som observeret langs vestsiden af søen. Fotoet taget i januar 2009 (Fig. 12, nederst tv) viser større cirkulære våger, mens der samme sted i januar 2010 kun kunne observeres fire cirkulære våger (0,5-1m diameter) ved en vanddybde på 0,5-0,75cm (Fig. 12, øverst til højre), hvori seepagemetre blev installeret til bestemmelse af seepage-rater fra kildevæld. Resultaterne af seepage-målingerne fremgår af tabel 4 og viser høje rater i 3 af de 4 våger. En systematisk indsamling af seepage-målinger langs østkysten vil ske i foråret/sommeren 2010.



Figur 12. Opsmeltningsfænomener langs vest- og østsiden af Vængsø.

Seepage st	AVG m3/yr	STD	m ³ /0,25m ² /yr	cm/dag	N, number of
afstand fra bred					tests
VS1- 4,7m	2,7	1,05	10	2-4	3
VS2 - 3,9m	694	239	2673	554-911	2
VS3 - 5,5m	373	29	1436	372-415	2
VS4 - 3,8m	250	18	963	250-278	2

Tabel 4. Seepage-rater i kildevæld (vs1-vs4) mellem v7 og v11, 6.-7. januar 2010

Figur 13 viser istykkelsen på den østlige side af søen ved de cirkelformede våger (Fig. 12, nederst til højre). Istykkelsen blev målt den 14. januar 2010 ved at bore huller i isen med et isbor (D=5cm). Istykkelsen blev målt i et 9*20 m grid af fire transekter placeret vinkelret på søbredden og ud på isen med en afstand på 0,5 m mellem målepunkterne. De fire transekter blev udlagt, så de overlappede fire visuelt synlige huller i isen (mørkeblå). De fire åbne områder var sammenfaldende med områder, hvor vi målte ekstremt høje seepage-rater (se

tabel 4). Der blev lokaliseret tre områder, hvor isen var omkring 5-6 cm tyk (turkis), og disse områder vil indgå i de systematiske indsamling af seepage-målinger i foråret/ sommeren 2010. Ca. 10 meter fra bredden stabiliserede istykkelsen sig på ~13 cm (rød). Målte istykkelser er interpoleret ved lineær interpolation i MATLAB.



Figur 13. Istykkelsen indmålt fra søkant til 30m vinkelret på bredden. I figurens venstre side ses tydeligt kildevældene vs1-vs4, hvori seepagemeter målingerne er foretaget. Blå farve er åbent vand.

Temperaturprofiler

Ud for de to transekter er temperaturprofiler blevet målt med temperaturspyd (Fig. 14). Metode og dataanalysen er nærmere beskrevet i Engesgaard et al (2009). Resultaterne med temperaturmetoden viser fluxrater (q_T) ved v7 på 0,5 cm/dag ,og ved v12 varierer værdien i intervallet 10-17 cm/dag (Tabel 5). Der ses tilsyneladende ingen effekt af aftagende indstrømning med afstanden fra søbredden.



Figur 14. Temperaturprofiler målt august 2009 ved transekter V7 og V12 på østsiden af Vængsø. Målte data (farve prikker) ved transekterne v7 (en afstand) og v12 (3 afstande fra bredden). Linierne viser simulerede profiler ved de i signaturforklaringen angivne fluxrater.

Tabel 5. Fluxrater	(q _T)	bestemt	med	temperat	turspyd
--------------------	-------------------	---------	-----	----------	---------

	v7	v12	v12	v12
Afstand fra søkant (cm)	400	30	230	413
Seepage-rate (cm/dag)	0,5	12,6	17,3	10,3

Delta O18

Resultaterne af delta-O18 prøvetagningen i og omkring Vængsø fremgår af figur 15. Langt hovedparten af prøverne i piezometrene samt i søvand/tilløb viser alle delta-O18 værdier, der tolkes som grundvand med delta-O18 værdier mellem -8,0 til -8,7. Flere grundvandsprøver udtaget fra piezometerrør under søbunden og på land viser delta-O18 værdier mellem -7,5 og -7,9, hvilket antagelig kan tilskrives en noget længere opholdstid i ripariske zoner hvor fordampningsprocessen kan nå en beskeden iltisotop fraktionering.

Derudover er der udtaget delta O18 prøver fra råvandsboring 97.759, i bassinet ovenfor skydehuset beliggende vest for søen samt i brunkulsgraven ved firmaet Dansand, der alle giver delta O18 værdier i overensstemmelse med typisk grundvandssignal.



Figur 15. Delta O18 i grundvand fra piezometre samt i sø- eller åvand fra tilløb

Grundvandskemi

Vandkemien i grundvandet under og omkring søen er undersøgt på baggrund af 5 prøvetagninger af grundvandet i de 18 piezometre v1-v18 (Fig. 5) i perioden maj til oktober 2009. Den gennemsnitlige sommerkoncentration (11/5-6/10 2009) af total fosfor (TP) varierer fra 20 til 210 µg/l i de 18 piezometre (Fig. 16). De laveste værdier findes ved det nordlige tilløb, mens den højeste værdi ligger ved det vestlige tilløb. Gennemsnittet for alle 18 piezometre er 95 µg TP/l, mens medianen er 90 µg TP/l. TP værdierne er generelt høje i det omgivende grundvand målt i piezometerrørene langs hhv. vest- og øst siden af søen. På indeværende tidspunkt er det dog ikke muligt at kvantificere massefluxen ind i søen.

Den gennemsnitlige sommerkoncentration af total kvælstof (TN) varierer fra under 0,01 til 5,69 mg/l. Gennemsnittet for alle 18 piezometre er kun 0,79 mg TN/l og medianen 0,15 mg TN/l, men niveauet i piezometer v6 og v9 er meget høje, hhv. 4,73 og 5,69 mg TN/l. Piezometer v6 er placeret i vandkanten i den nordvestlige del af søen. Piezometer v9 er placeret ca. 25 m fra vandkanten som en del af et transekt sammen med piezometer v7 og v8, som har markant lavere koncentrationer med gennemsnitlige sommerkoncentrationer på hhv. 52 og 77 mg TN/l.



Figur 16. Gennemsnitlig (n=5) sommerkoncentrationen (11/5-6/10 2009) af total fosfor (TP, rød kurve)) og total kvælstof (TN, blå kurve) i grundvand i18 piezometre i Vængsø i 2009.

Vængsø 2D model

Kontakten mellem grundvandsmagasinet og Vængsø er belyst med en 2D strømningsmodel. Vi ved fra vandspejlsmålinger i de to transekter v7 og v12 på østsiden af søen, at grundvandspotentielet er hhv. 0,55 og 1,07m højere end søens vandstand. Yderligere ved vi, at grundvandet strømmer til søen langs både søens vestlige og østlige bred, mens den regionale grundvandsstrømning er fra vest mod øst. Der må således konceptuelt være et grundvandskel umiddelbart øst for søen, som kan forklare dette strømningsmønster. 2D modellen bruges til at evaluere strømningsveje og mængder i kontakten mellem grundvand og sø.

2D modellen er opbygget ud fra et 1.360 meter langt profil gennem Vængsø og opland tilnærmet vinkelret på ækvipotentiale linjer (Fig. 17). Modellen beskriver strømningen i grundvandsmagasinet, som formodes at være i kontakt med Vængsø. Modellen afgrænses nedad af overgangen mellem bunden af grundvandsmagasinet og det underliggende lerlag, jf. den konceptuelle hydrogeologiske tolkningsmodel (Fig. 10). De vestlige og østlige grænsebetingelser er begge simuleret med fastholdt trykniveau på henholdsvis 30 og 25,5 m.o.h., jf. ækvipotentialekort. Den vertikal diskretisering er øget ved søenbredden samt horisontalt ved søens vandspejl. Vandstanden i søen er fastsat til 26,3 m.o.h. 2D modellen er opsat med MODFLOW og MODPATH (Fig. 18).

Søen simuleres med en *General Head (GBH)* grænsebetingelse med et trykniveau på 26,3 samt en *Conductance* på henholdsvis 106 og 53 m²/d afhængigt af cellestørrelse på henholdsvis 5 eller 10 meter (forskellig diskretisering i øst og vestlig del). *Conductance* defineres ud fra en hydraulisk ledningsevne (K) på 10,62 m/d (slugstest middel fra v7 og v12) ved: *Conductance* = (K / tykkelse af søbund) * tværsnitsarealet af cellen. Horisontal K (K_h) værdier for sand og organisk materiale sættes til henholdsvis 20 m/d og 0,001 m/d og forholdet mellem horisontal og vertikal K (K_h/Kv) til 3 for begge enheder.

Ved at justere conductance-parameteren samt K_{sand} kan forholdet mellem østlig og vestlig grundvandsindstrømning til søen påvirkes i modellen. Figur 19 viser en modelberegning, hvor der som eksempel er indsat en 50 cm tyk sandlinse fra sandmagasinet ind i den vestlige del af søen. Baggrunden for dette er den mulige grundvandsindsivning som kan ske her. Modellen viser, at selv en sådan lille "sandlinse" kan lede et betragteligt grundvandsbidrag til den overordnede vandbalancen. Lukkes denne linse (dvs. ingen hydraulisk kontakt), vil dette bidrag først strømme ind i søen på den østlige side. De numeriske beregningsceller i søbredden på både vest- og søsiden af Vængsø repræsenterer ifølge modellen i alt 95 % af den totale grundvandstilstrømning. Sidstnævnte scenarie er ikke medtaget i rapporten. Figur 12 viser isdækket på søen på henholdsvis vest og østsiden af søen i vinteren 2009 (jan/febr 2009). Bedømt ud fra det smeltede isdække på fotos ses det tydeligt, at der sker en udstrømning af "varmt" grundvand ved badebroen og vest for tilløb på vestsiden af søen, samt en udstrømning i kildevæld nær bredzonen ved transekt v7 på østsiden af søen.



Figur 17. Numerisk 2D model: Hydrogeologiske enheder, topografi og grænsebetingelser.



Figur 18. Simulerede trykniveauer samt strømningsanalyse ved MODPATH *particle track-ing*. Start og slutposition for hver udsat partikel i den vestlige del af modellen er markeret med sorte og røde prikker. Der er 100 dage imellem hver af de blå pile på partikelbanen.



Figur 19. Øverst: Grundvandsindstrømning simuleret i numeriske celler ved søens vestlige og østlige bred. Nederst: grundvandsbidragets procentvise fordeling fra vestsiden af søen (celle 1-3) og fra østsiden (celle 4-10)

Sammenligning af metoder til bestemmelse af grundvandsbidrag

Ved sammenligning af de tre metoder til beregning af flux-rater (tabel 6) ses en rigtig god overensstemmelse mellem seepagemeter og temperaturmålingerne, mens Darcy (eller transekt) metoden viser rater på op til en faktor 50-100 højere værdier afhængig af, om der anvendes horisontal eller vertikal hydraulisk gradient. Undtagelsen er v12 værdien for horisontal gradient på 3,3 cm/dag. Denne foreløbige undersøgelse viser, at variationen i seepage-rater for en stor del er kontrolleret af kildevæld (udstrømmende grundvand). Vi må dog ikke glemme, at en ukendt del af grundvandsindsivningen til søen på øst- og specielt på vestsiden er kontrolleret af seepage via de ripariske bredzoner. Denne strømningskomponent skal undersøgels nærmere i den videre undersøgelse af grundvandsindsivningen til Vængsø i tilknytning til bestemmelsen af indholdet af total P.

	Rate ind i søen, cm/dag									
Flux	٧7		v	12	Mellem v7 og v11					
q _{seep}	0,3-0	,5	14,0)-16,1	2-911 ³					
q⊤	0,5		10,3	3-17,3	-					
q _D	26,9 ¹	55,8 ²	619 ¹	3,3 ²	-					
	Flux q _{seep} q _T q _D	Flux v7 q _{seep} 0,3-0 q _T 0,5 q _D 26,9 ¹	$\begin{tabular}{ c c c c c } \hline Flux & $V7$ \\ \hline q_{seep} & $0,3$-$0,5$ \\ \hline q_T & $0,5$ \\ \hline q_D & $26,9^1$ & $55,8^2$ \\ \hline \end{tabular}$	$\begin{tabular}{ c c c c c c } \hline Flux & $V7$ & v \\ \hline q_{seep} & $0,3$-$0,5$ & $14,0$ \\ \hline q_T & $0,5$ & $10,3$ \\ \hline q_D & $26,9^1$ & $55,8^2$ & 619^1 \\ \hline \end{tabular}$	$\begin{tabular}{ c c c c c c c } \hline Rate ind i søen, cm/c \\ \hline Flux & v7 & v12 \\ \hline q_{seep} & 0,3-0,5 & 14,0-16,1 \\ \hline q_T & 0,5 & 10,3-17,3 \\ \hline q_D & 26,9^1 & 55,8^2 & 619^1 & 3,3^2 \\ \hline \end{tabular}$					

Tabel 6. Sammenligning af metoder til bestemmelse af grundvandsindsivning

¹Vertikal hydraulisk gradient

²Horisontale hydrauliske gradient

³ se variation mellem de 4 tætliggende kildevæld i tabel 4 og figur 13

Grundvandsbidrag fra vestsiden af søen

Indtil videre har vores hydrologiske undersøgelse koncentreret sig om søens østside. Ingen direkte målinger er foretaget på vestsiden, velvidende at et grundvandsbidrag af en ukendt størrelse strømmer til i denne zone. Modelresultaterne (Fig. 19) sandsynliggør en vis vestlig grundvandstilstrømning, og fotos fra vinteren 2009 (Fig. 12) viser store isfri arealer ved badebroen samt ved tilløb 2's indløb. Vi har indtil videre ikke kigget nærmere på disse bidrag i vores undersøgelse. Der forestår således en mindre feltmæssig indsats, hvor grundvandsbidraget fra vestsiden forsøges kvantificeret.

Vandbalance

Morfometri af Vængsø

De morfometriske nøgletal for Vængsø er som følger:

- søens areal (15,3ha);
- vand volumen (187.000 m³);

- gennemsnitsdybden (1,2m);
- hydrologiske opland opgjort i 1986 (900ha).

Klimadata:

DMI's nedbørstal repræsenteret ved en 10x10 km gridcelle(nr. 10523) med daglige værdier er anvendt. Årsmiddel for perioden 1989-2008 for den pågældende celle er beregnet til 753 mm/år (<u>www.novana.dmi.dk</u>). Dette er i god overensstemmelse med de nærliggende klimastationer i Løndal (6 km VNV) og Vestbirk (12km SSE), hvor årsmiddelværdierne er henholdsvis 826 og 776 mm/år i normalperioden 1961-90 (Frich et al, 1997). Middelnedbøren på 753 mm/år er efterfølgende korrigeret til 912 mm/år med de seneste standardkorrigerede arealværdier (Allerup et., 1998), hvor observeret nedbør i årsmiddel korrigeres op med 21%. Den samlede nedbørsmængde på årsbasis vil således udgøre 0,14 mill m³.

DMI 's fordampningstal for Vængsø området er repræsenteret ved en 20x20 km gridcelle (nr. 20074) med døgnværdier for perioden 2001-2008 (<u>www.novana.dmi.dk</u>). Fordampningen er beregnet som potentiel fordampning med Mankkink-ligningen, som anbefalet af Plauborg et al (2002). Fordampningen repræsenterer en arealværdi svarende til en våd engoverflade eller det der kommer nærmest en fri vandspejlsoverflade for en sø. Den potentielle fordampnings årsmiddel er beregnet til 595 mm/år. Den samlede potentielle fordampning på årsbasis udgør således <u>0,09 mill m³</u>.

Tilløb og afløb:

Vandføringen i *afløbet* fra Vængsø er blevet bestemt i perioden 2000-2009 med kontinuerte målinger i en vandføringsstation. Af bilag 6 fremgår årsgennemsnit og sommergennemsnit (maj-september). Vandføringen har på årsbasis svinget mellem 135 og 165 l/sek med und-tagelse af 2009, hvor vandføringen aftog markant til 120-125 l/sek svarende til et fald på 20%. Den gennemsnitlige sommervandføring har rimelig konstant ligget 5-10 l/sek under årsgennemsnittet. Den samlede afstrømning via afløbet i 2009 udgør således 3,8-3,9 mill m³.

De tre tilløb er målt mere sporadisk i 2009 (placering se Fig. 5). Sommergennemsnittet (n=5) for tilløb 1 og 2 i 2009 er bestemt til hhv. 10 og 9,4 l/sek. Vandføringsmålinger udføres for tiden i tilløb 3, så data foreligger pt. ikke. Dog vurderer DMU, at vandføringen i tilløb 3 er noget større end i tilløb 1 og 2. Det anbefales, at et fast måleprogram etableres for de tre tilløb de kommende år. Tilstrømning via tilløb 1 og 2 udgør således 0,3 mill m³ for hver af de to tilløb, mens vandmængden via tilløb 3 pt. er ukendt.

Foreløbig vandbalance for Vængsø

Total-ud budgettet er relativt enkelt at beregne til i størrelsesordenen **3,9-4,0 mill m³** vand, da denne del af vandbalancen kun består af vandføringen i afløbet fra søen samt den beregnede potentielle fordampning. Det er tydeligt, at årsgennemsnittet i vandføringen varierer betydeligt fra år til år og derfor er det vigtigt at fortsætte den kontinuerte vandføringsmåling af afløbet.

Total-ind budgettet omfatter nedbør, de tre tilløb, samt grundvandsbidraget via både østog vestsiden af søen. Nedbøren måles ikke direkte ved søen men data trækkes fra nærmeste DMI station og når den anbefalede nedbørskorrektion anvendes, udgør nedbøren samlet **0,14 mill m³**. Tilløb 1 og 2 er målt sporadisk gennem 5 måneder i 2009 og en årsværdi er beregnet. DMU skønner. at vandføringen i tilløb 3 giver i sammen størrelsesorden som tilløb 1 og 2 tilsammen eller samlet **1,2 mill m³** fra de tre tilløb. Dette betyder at det samlede grundvandsbidrag i 2009-tal må være i størrelsesordenen **2,5-2,7 mill. m³** for at opnå balance i ind- og udbudgettet for søen på årsbasis.

Overvejelser om grundvandsbidraget

Endelig er vi tilbage til forundersøgelses hovedformål - at bestemme grundvandsindsivningens størrelse og kvalitet. Den fortsatte systematiske indsamling af seepage data med tilhørende næringsstofmålinger i det kommende forår/sommer 2010 vil give et bedre indblik i indstrømningens variabilitet i tid og rum. Dette vil ikke føre til en deterministisk forståelse af hver enkelt kildevæld til søen, men vi forventer, at det fortsatte arbejde vil resultere i nogle sandsynlighedsintervaller, indenfor hvilke vi kan forvente at kunne observere indstrømningen til Vængsø. De foreløbige målinger på østsiden viser stor variation, og det er vores vurdering, at grundvandsindsivningen vil være i størrelsesordenen 2,5-2,7 m³ årligt. En detaljeret grundvandsmodel med de nye data vil antagelig kunne vise dette, hvor mængden af indsivende grundvand vægtes mellem øst- og vestsiden. Yderligere forventes en kvantitativ skelnen mellem bidrag via kildevæld og bredzone. Sidstnævnte forhold vil antageligvis være særlig vigtig, når stoffluxen af total fosfor skal vurderes.

Opholdstiden:

Opholdstiden pr. år for Vængsø beregnes som forholdet mellem søens volumen divideret med den årlige totale ind- eller udstrømning. Med andre ord 187.000 m³ / 3,8-3,9 mill m³ eller 0,05 år, svarende til 18-20 dage.

Planer om videreundersøgelser

- CFC-datering af grundvand i kilder på hhv. øst- og vestsiden af søen, samt i transekt under søen. Der kunne således etableres 4-5 boringer mere i søen med filtersætning af grundvandsmagasinet. Boringerne kan samtidig bidrage til kortlægningen af tykkelsen af det organiske sediment langs sejlrute 25 og 28
- Udførelse af hydrauliske tests med fokus på bestemmelse af vertikal hydraulisk ledningsevne i transekterne på østsiden af søen for at minimere usikkerheden på bestemmelsen af grundvandsindsivningen med Darcy-metoden
- Etablering af et fast måleprogram for vandføringen og tilhørende næringsstofmålinger i de tre tilløb. Afløbet vil fortsat blive logget fra vandføringsstationen
- Kvantificering af grundvandsfluxen ved alle piezometerrør samt den overfladiske tilstrømning via buffer zoner på både vest- og østsiden af søen.
- Prøvetagning af lokale vandforsyningsboringer i nærområdet til bestemmelse af den dybdemæssige fordeling af TP og TN i det omgivende grundvandsmagasin
- En bedre kvantitativ opgørelse af masseflux af fosfor via ripariske zoner og kildevæld set i kombination med dynamiske vandspejlsændringer i søen
- Forbedret grundvandsmodellering med tilhørende næringsstofmålinger udført på nye data
- Grundet det meget heterogene mønster i indstrømning langs østsiden af søen ville det antagelig være til stor hjælp at etablere et DTS temperaturkabel på søbunden til identificering af indstrømningszonerne langs hele østside. Dette ønske skal dog ses som et forslag på den lange bane.

Referencer

- Dybkjær K & Rasmussen ES (2006). Gamle alger viser vej til drikkevand. Aktuel Naturvidenskab, nr. 5, 22-25.
- Engesgaard P, Jensen J, Karan S, Kidmose J, Nilsson B (2009). Varme som tracer for udveksling mellem grundvand og overfladevand. Vand & Jord, 16(3),109-113.
- Frich P, Rosenørn S, Madsen H, Jensen JJ (1997). Observed precipitation in Denmark, 1961-1990. DMI Technical Report, 97-8.
- Geofysiksamarbejdet (2005) Kursusnoter i geofysik grundvandskortlægning. Geofysisk afdeling, geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Geofysiksamarbejdet (2008). Vejledning og kravspecifikation for MEP-målinger. Februar 2008.
- Nilsson, B., P. Jensen, T. Sonnenborg, J. Kidmose, S. Karan, and P. Engesgaard, Bestemmelse af grundvandstilstrømningen til Skærsø, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2007/65.
- Plauborg F, Refsgaard JC, Henriksen HJ, Blicher-Mathiasen G & Kern-Hansen C (2002). Vandbalance på mark- og oplandsskala. DJF rapport, nr. 70.

Skov- og Naturstyrelsen (1987). Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie 5.

Bilag

Bilag 1.	GPS indmåling	af regionale	boringer,	søer og basine	۶r
----------	---------------	--------------	-----------	----------------	----

boring/sø/bassin	x-koord	y-koord	kote MP	Indmålings- metode	Pejling fra MP	kote vsp	bemærkning
bassin (ovenfor							0
skydehus)	6210191	540306,5	48,917	R8		48,917	
dansand hul	6210490	539636,3	36,768	R8		36,768	
sø v. 97.406	6209567	541024,6	26,337	R8		26,337	
Blidsø	6211706	541694,6	24,937	R8		24,937	
Røde sø	6211652	540483,9	28,191	R8		28,191	
Oversø	6211773	540583,2	26,921	R8		26,921	
							Indvinding på-
97.759	6210313	539991	50,209	R8	23,42	26,789	går
97.1000	6210734	539828,2	47,57	borejournal	18,53	29,04	ro
97.861	6209916	540338,7	51,174	R8	21,18	29,994	ro
97.406	6209583	540925,6	33,193	R8	5,16	28,033	ro
97.1018	6208936	542139,8	42,244	R8	14,4	27,844	ro
97.925	6211088	541396,3	40,367	R8	14,8	25,567	pejling fra 2000
97.567	6211876	539477,8	50,05	R8	15,485	34,565	ro

piezometer	X-koord	Y-koord	Kote (top rør)	Indmå- lings-	Rørlængde (bund af	Top af rør (over søvsp)	Top af rør (over land)	Vand dybde	Org. mate- riale	Pejling (top rør)	kote	Pejling (top rør)	kote	
	0040400	540507.0	07.404	neloue			0.04			11.03.09	00.074	15.04.09	07.000	
V1	6210180	540597,6	27,461	Rð	1,70		0,21			1,09	26,371	0,435	27,026	
V2	6210178	540607.2	27.262	R8	1.70		0.27			0.40	26.862	0.39	26.872	
V3	6210174	540625.1	27.283	R8	4.50	0.97		0.90	1.75	0.57	26.713	0.59	26.693	
V4	6210403	540644,1	26,964	R8	5,51	0,40		0,70	3,75	0,05	26,914	0,05	26,914	
V5	6210404	540746.8	26.593	R8	3.24	0.28		0.40	2.06	0.02	26.573	0.01	26.583	
V6	6210523	540771.1	26.628	R8	4.04	0.27		0.55	2.87	0.04	26.588	0.03	26.598	
V7	6210044	540951,1	26,528	R8	1,66	0,24		0,60	0,00	0,00	26,528	0,25	26,278	
V8	6210044	540956.7	27.102	Niv. f. v9	1.61		0.35	0.00	0.00	0.62	26.482	0.66	26.442	
V9	6210045	540965,9	28,214	R8	2,04		0,56	0,00	0,00	0,82	27,394	0,90	27,319	
V10	6209977	540901.6	26.638	R8	2.09	0.26		0.48	0.52	0.23	26.408	0.23	26.408	
V11	6210247	540966.4	26.516	R8	1.50	0.25		0.47	0.00	0.05	26.466	0.14	26.376	
V12	6210434	540898,6	26,961	R8	2,07	0,67		0,42	0,60	0,14	26,821	0,08	26,886	
V13	6210547	540905.7	26.802	R8	2.10	0.54		0.45	0.39	0.07	26.732	0.05	26.757	
V14	6210672	540855.5	27.524	R8	2.07	0.58		0.50	0.45	0.01	27.514	0.56	26.964	
V15	6210082	540764,1	26,694	R8	2,10	0.52		0,40	0.59	0,07	26,624	0,03	26,664	
V16	6210686	540744.7	26.836	R8	11.50			1.80	8.80	Overløb		Overløb		
V17	6210435	540902.7	27.084	Niv.f. v12						0.26	26.824	0.22	26.864	
V18	6210421	540917.5	27.313	Niv.f. v12						0.45	26.863	0.42	26.893	
V19	6210237	540828.2	26.546	R8	10.00	?		1.60	8.00	inaen	inaen			
vandstandsbræt	6210207	540632,2	26,959	R8										
Søoverflade			26.298	R8										

Bilag 2. GPS indmåling og nivellement af nyinstallerede piezometre; dimensioner af piezometerrørene; samt tykkelse af de organiske aflejringer. Transekter: v1+ v2 +v3 (sø); v7 (sø)+ v8+v9¹; v12 (sø)+ v17+ v18². Pejlinger fra to pejlerunder er vist (11. marts 2009 og 15. april 2009).

¹ Transekt v7, v8, v9. Afstand v7(sø)-søbred: 5,60m; v8(land)-søbred: 1,0m; v9(land)-søbred:10,5m. ² Transekt v12, v17, v18. Afstand v12(sø)-søbred: 1m; v17(land)-søbred: 6,5m; v18(land)-søbred: 13m.

Sample Name	Avg.	StdDev	n
JBK_09_1	-8,19	0,15	5
JBK_09_3	-7,90	0,12	3
JBK_09_4	-8,23	0,16	4
JBK_09_Soe_V04	-8,23	0,16	5
JBK_09_Soe_V05	-8,41	0,10	4
JBK_09_Soe_V06	-8,46	0,16	4
JBK_09_Soe_V07	-8,07	0,11	5
JBK_09_Soe_V10	-8,15	0,15	4
JBK_09_Soe_V11	-8,53	0,12	3
JBK_09_Soe_V12	-8,12	0,17	3
JBK_09_Soe_V13	-7,40	0,20	3
JBK_09_Soe_V14	-8,49	0,11	4
JBK_09_Soe_V15	-8,41	0,20	3
JBK_09_Soe_V16	-8,36	0,09	4
JBK_09_TILLOEB1	-7,66	0,16	3
JBK_09_TILLOEB2	-8,30	0,19	4
JBK_09_V1	-8,80	0,21	4
JBK_09_V2	-8,43	0,20	3
JBK_09_V3	-8,72	0,05	4
JBK_09_V4	-8,62	0,10	3
JBK_09_V5	-8,67	0,16	3
JBK_09_V6	-8,53	0,12	4
JBK_09_V7	-8,78	0,18	3
JBK_09_V8	-8,33	0,14	5
JBK_09_V9	-8,83	0,18	5
JBK_09_V10	-7,78	0,13	4
JBK_09_V11	-7,66	0,19	4
JBK_09_V12	-8,28	0,29	4
JBK_09_V13	-8,65	0,18	4
JBK_09_V14	-8,47	0,20	3
JBK_09_V15	-8,97	0,22	3
JBK_09_V16	-8,18	0,15	4
JBK_09_V17	-7,53	0,23	4

Bilag 3. Iltisotoper fra piezometerrør, boringer, sø og tilløb

1: basin (ovenfor skydehus)

3: boring 97.759 (råvand)

4: brunkulsgrav (Dansand basin)

Bilag 4. Vandkemi

	Kemi	Vængsø										
			ufilt.	filt.	filt.	ufilt.	filt.	filt.	ufilt.			
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		mS/m	cm
År	Dato	Rør nr.	TN	Nitrat/nitri	NH4-N	TP	Ortho_P	Silikat-Si	T-Fe	рН	Kond.	pejling
2009	15-apr	1	1,75	< 0,01	0,228	0,362	0,03	4,6	2,09	8,19	20,4	43,5
		2	0,05	< 0,01	0,054	0,076	0,044	6,19	0,74	6,79	23,2	39
		3	< 0,05	< 0,01	0,007	0,253	0,033	6,81	3,95	6,59	44,2	59
		4	< 0,05	< 0,01	0,025	0,204	0,004	5,49	2,73	6,98	30,8	5
		5	< 0,05	< 0,01	0,007	0,097	0,035	7,37	3,05	6,66	33,9	1
		6	2,6	1,97	0,548	0,167	0,015	4,48	0,57	7,15	31,5	3
		7	0,15	< 0,01	0,149	0,101	0,047	7,16	0,3	7,08	28,7	25
		8	< 0,05	< 0,01	0,023	0,073	0,021	4,14	0,2	7,9	33,4	66
		9	4,35	3,44	0,112	0,127	0,029	5,35	1,52	8,77	28,8	89,5
		10	< 0,05	< 0,01	0,029	0,095	0,012	4,59	1,19	7,2	23,6	23
		11	0,05	< 0,01	0,033	0,137	0,008	8,74	6,1	7,95	28,5	4,5
		12	< 0,05	< 0,01	0,023	0,148	0,008	9,24	1,01	7,96	30,9	14
		13	< 0,05	< 0,01	0,031	0,11	0,008	8,82	1,14	7,97	27,8	7,5
		14	< 0,05	< 0,01	0,023	0,073	0,008	7,9	2,06	7,88	30,5	56
		15	0,1	< 0,01	0,011	0,116	< 0,001	4,59	0,61	6,9	28,7	3
		16	0,1	< 0,01	0,04	0,043	< 0,001	5,04	1,54	7,69	22,7	overløb
		17	< 0,05	< 0,01	0,23	0,118	0,004	7,85	1,3	7,9	58,9	22
		18	1	< 0,01	0,032	0,612	0,044	7,58	7,59	6,39	34,6	42
		19										
		Tilløb 1/Nord	0,8	0,75	0,014	0,05	0,01	6,01	0,6	6,5	28	
		Tilløb 2/Vest	1,45	1,29	0,019	0,05	0,018	6,23	0,6	6,66	28,4	
Søer	1											
2008	8-dec		0,9	0,57	0,268	0,054	0,021	6,78	0,48	7,17	27,7	
	1-apr		0,55	< 0,01	0,002	0,074	0,004	2,7	0,44	7,59	26,5	
	sommersnit (maj-se		0,72	< 0,01	0,014	0,13	0,009	6,83				

Bilag 5. GPR profiler





Bilag 6. Vandføring i afløbet fra Vængsø i årene 2000-2009 angivet dels som årsgennemsnit og sommergennemsnit (1/5-30/9).

Bilag 7. Vængsø 6-7. januar 2001 seepage ved østsiden mellem v7 og v11

						seepage rate					
sted	dato	tid, min	før, g	efter, g	difference, liter	mL/min	m3/yr	m/day	cm/day	m/yr	
vs1	6-01-2010	20,00	1397	1545	0,148	7,4	4	0,04	4	15	
vs1	7-01-2010	31,00	1866	1975,5	0,1095	3,5	2	0,02	2	7	
vs1	7-01-2010	31,00	1735	1876	0,141	4,5	2	0,03	3	9	
vs2	7-01-2010	2,00	1291	4574	3,283	1641,5	863	9,11	911	3324	
vs2	7-01-2010	1,90	1317	3214	1,897	998,4	525	5,54	554	2022	
vs3	6-01-2010	84,00	1388	3552	2,164	25,8	14	0,14	14	52	fuld
vs3	7-01-2010	2,25	1186	2693	1,507	669, 8	352	3,72	372	1356	
vs3	7-01-2010	1,07	1110	1908	0,798	748,1	393	4,15	415	1515	
											st. oxide-
vs4	6-01-2010	10,00	1477	3045	1,568	156,8	82	0,87	87	318	ret, fuld
vs4	7-01-2010	7,00	1369	4871	3,502	500,3	263	2,78	278	1013	
vs4	7-01-2010	5,00	1378	3634	2,256	451,2	237	2,50	250	914	

GPS koordinator:									
Location	UTM-N	UTM-E	Elevation						
VS1	6210159,166	540946,866	26,345						
VS2	6210169,657	540949,763	26,348						
VS3	6210173,687	540948,973	26,322						
VS4 Ice-	6210175,521	540951,116	26,356						
surface	6210171,393	540953,357	26,357						

Bilag 8. (a) østsiden ved transekt v7, (b) vestlig tilløb og (c) ved ny badebro på vestsiden.



(a) Søbunden er her sandet, og man kan nemt gå på den. Der bliver dog meget hurtigt dybt.



(b) Det meste af den åbne vandflade ligger vest for grøften, som kommer fra vandhullet ved den faldefærdige gård. Der er næsten ingen strøm i grøften fra vandhullet.



(c) De to fotos er taget fra den restaurerede og sydligste af de to broer. Det åbne vand strækker sig fra ca. 50 m ud i søen. Søbunden er mudret, og man kan ikke gå på den.