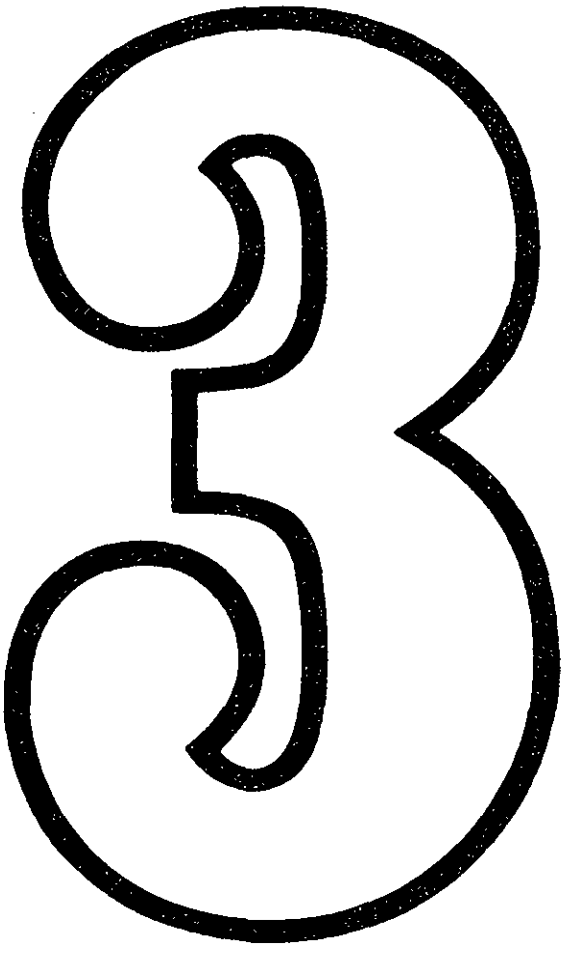
556.18
827-1

MILJØ-PROJEKTER



HYDROLOGISKE UNDERSØGELSER I SUSÅENS OPLAND under anvendelse af hydrologiske modeller

August 1977

Udført af

Instituttet for Strømningsmekanik
og Vandbygning
Danmarks tekniske Højskole

for

miljøstyrelsen · Kampmannsgade 1 · 1604 København V · Tlf. (01) 14 83 10

556.18 : 556.38 : 556.53
B 27-1 u. 3

Miljøstyrelsen vil, når lejlighed gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor miljøsektoren, helt eller delvis finansieret af miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

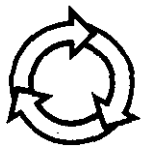
miljøstyrelsen

HYDROLOGISKE UNDERSØGELSER I SUSÅENS OPLAND

under anvendelse af hydrologiske modeller

MILJØSTYRELSEN
BIBLIOTEKET
STRANDGADE 29
1401 KØBENHAVN K

August 1977



Dette hæfte er trykt på genbrugspapir

ISSN 0105-3094

Fu 00-91

SCANTRYK, KBHVN
TELEFON 01-30 06 01

FORORD

Den stigende anvendelse af vand til forskellige formål medfører en øget risiko for, at vandindvinding kan medføre sådanne ændringer i vandets kredsløb i naturen, at der fremkommer utilsigtede økologiske virkninger. Især på Sjælland er vandressourcerne så stærkt udnyttede - bl.a. til hovedstadsområdets vandforsyning - at miljøministeren har ment, at der burde iværksættes nærmere undersøgelser over en øget vandindvindings økologiske effekt. Ved skrivelse af 8. januar 1975 anmodede miljøministeren derfor miljøstyrelsen om i samarbejde med Hovedstadsrådet, Vestsjællands og Storstrøms amtsråd og Københavns kommune at tilrettelægge en videregående undersøgelse af de økologiske konsekvenser af forøget vandindvinding på Sjælland.

Vandindvindingens hydrologiske virkning er den primære årsag til eventuelle økologiske effekter. Derfor er det nødvendigt at skaffe sig oplysninger om vandindvindings hydrologiske virkninger som led i undersøgelser over de mulige økologiske bivirkninger.

Miljøstyrelsen anmodede derfor Dansk Komité for Hydrologi (DKH) om at være miljøstyrelsen behjælpelig med opstilling af et hydrologisk undersøgelsesprogram. Det opstillede program blev derefter drøftet med Vestsjællands og Storstrøms amtsråd, Københavns kommune, Hovedstadsrådet og Naturfredningsrådet, der fandt undersøgelsesprogrammet egnet til gennemførelse og erklærede sig villige til at deltage i undersøgelsen i den udstrækning, programmet i forvejen indgik i de pågældende myndigheders arbejdsområder. Københavns Vandforsyning og Vestsjællands og Storstrøms amtsvandinspektorater m.fl. har bl.a. stillet et betydeligt observationsmateriale til rådighed for undersøgelsen.

I det opstillede hydrologiske undersøgelsesprogram blev der lagt vægt på udvikling og anvendelse af metoder, der tillader at forudberegne den hydrologiske effekt af en givet fremtidig vandindvinding. Sådanne undersøgelsesmetoder åbner mulighed for at inddrage de hydrologiske og dermed de økologiske hensyn i det vurderingsgrundlag, der danner basis for kommunalbestyrelsers, amtsråds eller miljøstyrelsens meddelelse af tilladelse til vandindvinding. Det blev derfor besluttet, at der skulle opstilles mate-

matiske hydrologiske modeller for Suså-Vendebæk-området og for Susåens opland ved tilløbet til Tystrup-Bavelse Sø.

Undersøgelsesområdet - Susåens opland - er valgt, fordi der i dette område allerede findes et betydeligt hydrologisk observationsmateriale, der kunne anvendes i det hydrologiske undersøgelsesprogram. Endvidere er Næstved, Ringsted og Københavns kommuner interesseret i at iværksætte vandindvindinger i området. Disse vandindvindinger er i hovedsagen endnu ikke iværksat, men der er udført store forundersøgelsesarbejder, hvis data og resultater også kunne anvendes ved opstillingen af matematiske hydrologiske modeller for området.

Opgaven med indsamling af det eksisterende hydrologiske observationsmateriale samt dets bearbejdning og opstillingen af de hydrologiske modeller for området blev overdraget til Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning (ISVA), Danmarks tekniske Højskole, der i nærværende rapport fremlægger resultatet af undersøgelsen.

Det er miljøstyrelsens håb, at rapporten dels vil bidrage til at belyse de vandindvindingsmæssige problemer i Susåens opland og dels vil kunne være til inspiration i andre områder i landet, hvor den stigende interesse for den samlede anvendelse af vore vandressourcer til vandindvinding, rekreative formål, recipient for spildevand, dambrug og lign. gør det påkrævet, at beslutning om indgreb i vandets kredsløb i form af større vandindvindinger hviler på et bedre kendskab til indvindingens virkning på det samlede hydrologiske kredsløb. Det bør i denne forbindelse påpeges, at den foreliggende undersøgelse er baseret på allerede eksisterende data og observationsmateriale m.v. Den er således et eksempel på indsamling, bearbejdning og udnyttelse af et sådant materiale med det formål at anvende dette i størst mulig udstrækning ved besvarelsen af praktiske spørgsmål vedrørende vandindvinding og dens konsekvenser for omgivelserne.

Samtidig vil undersøgelsen kunne indgå som en del af baggrunden for det danske bidrag til De Forenede Nationers Internationale Hydrologiske Program (IHP), idet DKH, der forestår den danske deltagelse i IHP, har besluttet, at det danske forskningsprogram skal iværksættes inden for Susåens opland.

Miljøstyrelsen har endvidere som den anden del af opgavens løsning iværksat undersøgelser over de økologiske virkninger, en øget vandindvinding må antages at medføre i Susåens opland. Disse undersøgelser udføres af en række forskningsinstitutioner m.v. med særlig sagkundskab på området, men er endnu ikke afsluttet. Resultaterne af undersøgelserne vil senere blive offentliggjort af miljøstyrelsen.

Miljøstyrelsen.

August 1977.

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
INDLEDNING	1
1. OPSTILLING AF MATEMATISK-NUMERISK GRUNDVANDSMODEL	5
1.1 Målsætning	5
1.2 Teoretisk baggrund	5
1.3 Analytiske løsningsmetoder	6
1.4 Numeriske løsningsmetoder	7
1.4.1 Tyson-Weber metoden	8
1.5 Opbygning af model i Suså-Vendebæk-området	11
1.5.1 Geologi og hydrologi	12
1.5.1.1 Grønsandsaflejringer	12
1.5.1.2 Prækvartærets trykniveau	13
1.5.1.3 Lækageforhold	14
1.5.2 Hydrauliske parametre	15
1.5.3 Randbetingelser	18
1.5.3.1 Prøvepumpning i Suså-Vendebæk området	19
1.5.3.2 Prøvepumpning ved Tybjerglille	20
1.5.3.3 Prøvepumpning ved Pindsobro	21
1.5.3.4 Prøvepumpning ved Regnemark	21
1.5.3.5 Indvinding ved Regnemark	22
1.5.3.6 Årstidsfluktuationer i pejleboringer i prækvartær	24
1.5.4 Konstruktion af polygonnet i Suså-Vendebæk-området	25
1.5.5 Modelkalibrering	27
1.5.5.1 Fase 1: 4-døgns prøvepumpning	28
1.5.5.2 Fase 2: Trykniveauer august 1974	30
1.5.5.3 Fase 3: Årstidsfluktuationer	34
1.5.5.4 Fase 4: Trykniveauvariationer maj-juni 1974	38
1.6 Vurdering af modellen	40

2. MATEMATISK MODEL FOR VANDLØBSAFSTRØMNINGEN 42

2.1 Indledning 42
2.2 Målsætning 42
2.3 Nedbør afstrømningdmodellen 44

2.3.1 Modelopbygningsarbejdet 44
2.3.2 Den endelige model, NAM 45
2.3.3 Datakrav 48
2.3.4 Modelparametre 49

2.4 Kalibrering af NAM på Suså-området 54

2.4.1 Dataindsamling 54
2.4.2 Speciel hensyntagen af NAM til Suså-området i Suså-området 55
2.4.3 Kalibreringsresultater. Modelparametre. 58

2.5 Vurdering af modellen og dens anvendelighed i Suså-området 70

3. HYDROLOGISK SAMSPIL MELLEM OVERFLADEVAND OG GRUNDVAND 72

3.1 Hydrogeologisk beskrivelse af de kvartære formationer 72
3.2 Vandudveksling mellem det primære grundvandsmagasin og vandløbene 73

3.2.1 Temperaturmålinger 73
3.2.2 Modelbeskrivelse af vandudvekslingen 77

3.3 Model for årstidsfluktuationer i grundvandets trykniveau 77
3.4 En fremtidig integreret overfladevands- grundvandsmodel 81

4. GRUNDVANDSINDVINDING I SUSÅ-VENDEBÆK-OMRÅDET 83

4.1 Indledning 83
4.2 Simulering af grundvandsudvinding 84

4.2.1 Konstant ind-/udstrømning over modelranden 84
4.2.2 Gradientafhængig ind-/udstrømning over modelranden 86

4.2.3 Øget lækage ved Haslev 87

4.3 Vurdering af simuleringsresultater 89

5. GRUNDVANDSMAGASINETS REAKTION PÅ KUNSTIG INFILTRATION AF OVERFLADEVAND 92

5.1 Indledning 92

5.2 Mulighederne for formindskelse af uønskede effekter ved kunstig infiltration 93

5.3 Mulighederne for forøgelse af grundvandsindvindingen ved kunstig infiltration 94

5.3.1 Problemstilling 94

5.3.2 Forudsætninger 95

5.3.3 Simuleringskørsler 96

5.4 Vurdering af resultater 99

6. HARALDSTED-GYRSTINGE SØOMRÅDET 101

6.1 Indledning 101

6.2 Hydrologisk beskrivelse 101

6.2.1 Haraldsted-Gyrstinge søsystemet 101

6.2.2 Grundvandsindvinding til Regnemark 104

6.2.3 Hydrologiske data 106

6.3 Kalibrering af nedbør-afstrømningsmodel (NAM) 106

6.3.1 Indledning 106

6.3.2 Frøsmose Å 107

6.3.3 Vigersdal Å 107

6.4 Beregning af indstrømningen til Haraldsted Sø 1972-74 113

6.4.1 Indledning 113

6.4.2 Direkte simuleringer ved anvendelse af NAM 113

6.4.3 Indirekte beregning ved hjælp af vandbalanceberegninger for hele Haraldsted-Gyrstinge søsystemet. 114

6.4.4 Vurdering af resultaterne 115

6.5 Forøget nedsivning som følge af faldende grundvandstrykniveau inden for Haraldsted Sø's opland. 118

6.6 Konklusion vedrørende grundvandsindvindingens indflydelse på indstrømningen til Haraldsted Sø. 120

6.7 Vandindvinding fra Haraldsted og Gyrstinge Søer 121

6.7.1 Indledning 121

6.7.2 Reservoirpolitik 121

6.7.3 Beregninger af de hydrologiske konsekvenser af vandindvinding fra søerne 125

7. INDVINDING AF OVERFLADEVAND FRA RESERVOIRER LANGS SUSÅENS NEDRE LØB 129

7.1 Indledning 129

7.2 Hydrologisk beskrivelse 130

7.2.1 Tystrup-Bavelse Sø 130

7.2.2 Kunstige søer langs Susåen 131

7.2.3 Indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø 133

7.3 Reservoirpolitik og vandbalancemodel for Tystrup-Bavelse Sø 136

7.4 Stokastisk model for indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø 137

7.4.1 Opbygning af en stokastisk model 137

7.4.2 Anvendelse af den stokastiske model 140

7.5 Beregning af de hydrologiske konsekvenser af vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø. 143

RESUME OG KONKLUSIONER 152

LITTERATURLISTE 158

APPENDIX I 160

Tabel over boringsnumre.

APPENDIX II 162

Det internationale hydrologiske program

BILAGSFORTEGNELSE (i særskilt kassette)

Bilag nr. 1. Geologisk basisdatakort

2. Kort over grundvandets trykniveau i de prækvartære formationer, august 1974.

3. Kort over trykniveausænkninger i de prækvartære formationer ved slutningen af KV's prøvepumpning 27-31/5 1974.

BILAGSFORTEGNELSE (fortsat)

Bilag nr. 4. Kort over trykniveausænkninger i de prækvartære formationer under prøvepumpning ved Regnemark, Tybjerglille og Pindsobro.

5. Kort over trykniveausænkninger i de prækvartære formationer pr. 1.1.1976 forårsaget af indvindingen ved Regnemark.

6. Kort over årstidsfluktuationer i grundvandets trykniveau i de prækvartære formationer.

7. Grundvandsmodellens polygonnet med de kalibrerede hydrauliske parametre.

8. Placering af grundvandsmodellens polygonnet med angivelse af modellens vandudveksling med omgivelserne.

9. Kort over observerede og simulerede trykniveauer i de prækvartære formationer pr. august 1974.

10. Kort over simulerede trykniveausænkninger i paleocæn i ligevægtstilstanden ved indvinding af 21 mill m^3/år.

11. Kort over simulerede trykniveausænkninger i paleocæn i ligevægtstilstanden ved indvinding af 21 mill. m^3/år.

12. Kort over simulerede trykniveauvariationer ved indvinding af 38 mill. m^3/år med kunstig infiltration af 20 mill. m^3/år.

INDLEDNING

Arbejdets gennemførelse

Nærværende rapport er resultatet af Miljøstyrelsens anmodning til Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning (ISVA), Danmarks tekniske Højskole, om at gennemføre de i forordet omtalte undersøgelser over en øget vandindvindings hydrologiske effekt i Suså-området. Tidsrammen blev fastsat til 1½ år begyndende 1. januar 1976.

Undersøgelsen er gennemført som et nært samarbejde mellem de involverede personer, hvorfor en skarp opdeling af det foreliggende arbejde mellem disse personer ikke lader sig foretage. I grove træk kan det dog anføres, at civilingeniør Kurt Ambo Nielsen har varetaget de hydrologiske aspekter, mens civilingeniørerne Ole Stang og Jens Christian Refsgaard har forestået den modelberegningsmæssige behandling af henholdsvis grundvands- og overfladevandsdelen. Professor Eggert Hansen har fungeret som projektleder.

Undersøgelsen er i al overvejende grad gennemført på grundlag af allerede foreliggende informationer og data. Der er således kun i ubetydeligt omfang foretaget selvstændige dataregistreringer, men derimod i betydeligt omfang en indsamling af foreliggende relevante data fra involverede amtskommuners og vandforsyningers arkiver samt derudover naturligvis fra Danmarks Geologiske Undersøgelse, Det danske Hedeselskab, Meteorologisk Institut m.fl.

Rapportens opbygning

Rapporten lader sig naturligt opdele i to hoveddele. Den ene del omfattende kapitlerne 1-3 omhandler i hovedsagen en grundlæggende præsentation af de vigtigste af de benyttede hydrologiske modeller, nemlig grundvands- og afstrømningsmodellerne. De efterfølgende kapitler 4-7 illustrerer, hvorledes sådanne matematiske hydrologiske modeller med fordel kan anvendes i forbindelse med vurderinger af de hydrologiske konsekvenser af forskellige former for udnyttelse af vandressourcen, hvad enten det drejer sig om grundvand eller overfladevand.

De enkelte af kapitlerne 4-7 er tilstræbt affattet på en sådan måde, at de kan læses uafhængigt af hinanden samt i hovedsagen også uafhængigt af de foregående kapitler 1-3.

Selv om det naturligvis vil give det største samlede udbytte at læse hele rapporten, skulle det derfor være muligt med et rimeligt udbytte at orientere sig om rapportens indhold ved at tage udgangspunkt i et eller flere af anvendelseskapitlerne 4-7 i kombination med lejlighedsvise opslag i præsentationskapitlerne 1-3.

Kortfattet resume

Kapitel 1 indeholder en beskrivelse af den benyttede numeriske grundvandsmodels opbygning. Derudover redegøres for modellens tilpasning på det betragtede område, indbefattet en fastlæggelse af grundvandsmagasinets hydrauliske parametre samt områdets begrænsning med tilhørende randbetingelser. I denne forbindelse udnyttes såvel resultaterne fra tidligere prøvepumpninger som observationer af den tidslige og stedlige variation af tryknivеauforholdene i grundvandsmagasinet således som registreret gennem en længere årrække hovedsageligt af Københavns Vandforsyning.

Kapitel 2 indeholder en beskrivelse af den benyttede matematiske model for vandløbsafstrømning. Der redegøres for modellens struktur, og det fremgår heraf, at den principielle opbygning er baseret på en forenklet beregningsmæssig efterligning af det hydrologiske kredsløbs landfase. Derudover omtales modellens krav til indgangsdata samt hvilke resultater, der ud over den egentlige vandløbsafstrømning fremkommer ved anvendelse af modellen. De i modellen indgående parametre og deres fysiske betydning diskuteres. Der er redegjort for fastlæggelsen af de optimale modelparametre samt diskuteret den sikkerhed, hvormed de er bestemt i afhængighed af længden af den disponible kalibreringsperiode. Endelig er foretaget en speciel tilpasning med tilhørende kalibrering på en række deloplande inden for Suså-området.

Kapitel 3 omhandler en vurdering af det hydrologiske samspil mellem overfladevand og grundvand i Suså-området, og man har belyst vandudvekslingen mellem på den ene side det dybtliggende primære grundvandsmagasin og på den anden side vandløb samt højereliggen-

de sekundære grundvandsforekomster. Vurderingen er foretaget dels på grundlag af foreliggende hydrogeologiske informationer dels på grundlag af simuleringsberegninger af årstidsfluktuationerne i det primære grundvandsmagasins trykniveauforhold gennemført ved hjælp af de i kapitel 1 og 2 omtalte grundvands- og afstrømningsmodeller. Vandudvekslingen mellem det primære grundvandsmagasin og vandløbene er yderligere søgt belyst ved et mindre antal vandtemperaturmålinger på udvalgte vandløbsstrækninger.

Kapitel 4 omhandler en vurdering af de hydrologiske konsekvenser af en grundvandsindvinding af given størrelse i Suså-området baseret på anvendelse af den i kapitel 1 omtalte grundvandsmodel. Specielt den resulterende trykniveausænkning i det primære grundvandsmagasin samt formindskelsen i Susåens vandføring er behandlet. I konsekvens af den usikre viden om indstrømningsforholdene for grundvand langs områdets rand samt nedsivnings- og lækageforholdene inden for området er resultaternes følsomhed over for ændringer i disse faktorer undersøgt.

Kapitel 5 indholder en vurdering af mulighederne for ved kunstig nedpumpning af overfladevand til det primære grundvandsmagasin i vinterhalvåret dels at reducere de negative konsekvenser af en grundvandsindvinding på sommervandføringen i områdets vandløb dels at øge det beløb, der kan oppumpes som grundvand jævnt fordelt over hele året. Der er herunder ikke taget hensyn til forureningsmæssige og hygiejniske aspekter.

Kapitel 6 omhandler en vurdering af, hvilken indflydelse overfladevandsindvinding fra Haraldsted-Gyrstinge Søerne kan have på såvel vandspejlsniveauerne i søerne som udstrømningen til Ringsted Å. Hovedformålet med dette afsnit er at illustrere, hvorledes man ved hjælp af matematiske modeller, herunder ikke mindst den i kapitel 2 omtalte afstrømningsmodel, kan inddrage alt relevant hydrologisk datamateriale i en konkret undersøgelse og således forbedre grundlaget for en forudsigelse af de resulterende hydrologiske konsekvenser af en overfladevandsindvinding.

Kapitel 7 omhandler en vurdering af de hydrologiske konsekvenser af en eventuel udnyttelse af vand fra Tystrup-Bavelse Sø. På basis af en opstillet vandbalancemodel for Tystrup-Bavelse Sø samt målte eller simulerede vandtilstrømninger er der gennemført beregninger af de resulterende vandspejlsvariationer og afløbsva-

riationer fra søen i konsekvens af alternative kombinationer af overfladevandsindvinding, nedpumpning af vand til grundvandsmagasin og overførsel af vand til Haraldsted-Gyrstinge Søerne via Frøsmose Å. Hvad angår tilstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø er der i forbindelse med beregningerne anvendt historiske data såvel som data genereret ved hjælp af en stokastisk model.

Praktiske bemærkninger

De bilag, hvortil der henvises i denne rapport, findes i en separat bilagskassette.

I rapporten og på bilagene benyttes boringsnumre efter Københavns Vandforsynings nummersystem. En konverteringstabel fra KV-numre til DGU-numre for de benyttede brønde og boringer er givet som APPENDIX I i rapporten.

1. MATEMATISK-NUMERISK GRUNDVANDSMODEL

1.1. Målsætning

Den matematisk-analytiske formulering af ikke-stationære variationer i grundvandets trykniveau har været kendt i mange år og anvendt til løsning af strømningsproblemer i grundvandsmagasiner. Disse beregninger må imidlertid ofte baseres på ikke uvæsentlige simplifikationer af naturen, og kun få af de mange mekanismer, der bestemmer vandets kredsløb i naturen, kan tages i regning samtidig.

Det øgede kendskab til de enkelte elementer i det hydrologiske kredsløb samt de senere års udvikling af datamaskiner har bevirket, at det nu er muligt at foretage konsekvensberegninger ved hjælp af matematisk-numeriske modeller, der i langt højere grad, end det før har været tilfældet, kan beskrive selv komplicerede grundvandsmagasiners respons på et givet indgreb.

Formålet med anvendelse af matematisk-numeriske grundvandsmodeller er at simulere følgevirkninger på omgivelserne af forskellige menneskelige indgreb i det hydrologiske kredsløb. Dette kan lade sig gøre, fordi datamaskinen er i stand til kvantitativt at behandle store mængder data, som ellers kun ville kunne vurderes kvalitativt. Herudover vil en samlet behandling af data af forskellig natur såsom nedbør, vandløbsafstrømning, trykniveauvariationer m.v. medvirke til en øget forståelse af de grundlæggende mekanismer, der styrer vandets kredsløb i naturen. Herved bliver det muligt bedre at planlægge en optimal udnyttelse af vandressourcerne, det være sig grundvand som overfladevand.

1.2. Teoretisk baggrund

Under forudsætning af horisontal strømning i det vandførende lag kan grundvandets bevægelse beskrives ved den partielle differentialligning:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial h}{\partial y}\right) = S\frac{\partial h}{\partial t} + Q \qquad (1)$$

hvor beskrivelsen er henført til et horisontalt x-y koordinatsystem, og h er grundvandspotentialet eller trykniveauet.

Som regel søges (1) løst med hensyn til h, således at h ønskes fundet som funktion af stedet og tiden t. Hertil kræves kendskab til reservoirets magasintal og transmissivitet, S og T, og det område i x-y planen, inden for hvilket løsninger søges, må afgrænses, og de tilhørende randbetingelser fastlægges. Størrelsen Q redegør for magasinets vandudveksling pr. arealenhed med omgivelserne (oppumpning, nedsivning af nedbør eller overfladevand fra åer, moser el.lign.). (1) er strengt taget kun gældende for artesiske reservoirer, men kan i praksis også anvendes for grundvandsstrømninger i frie reservoirer. Mens T og S opfattes som parametre, kan Q betegnes som en delvis uafhængig, naturgiven variabel, og h er den afhængige variable, som kan findes med kendt T, S og Q.

I det foreliggende tilfælde eksisterer der flere prøvepumpninger foretaget i og omkring Susåens opland. Disse giver udførlige oplysninger om størrelsen af magasintal S og transmissivitet T og fastlægger i store træk områdets begrænsninger. Grundvandsmagasinets vandudveksling med omgivelserne lader sig imidlertid ikke altid helt enkelt bestemme. Udbredt lækage (tilstrømning fra andre grundvandsforekomster med højere trykniveau) giver sig til kende i sænkningsforløbet ved prøvepumpninger af tilstrækkelig varighed. Lokalt betinget vandudveksling med bl.a. overfladeмagasiner kan derimod andrage uanselige vandmængder set i relation til grundvandsreservoiret og alligevel være af betydning for f.eks. vandføringen i områdets vandløb. Den aktuelle størrelse af vandindvindingen kendes som regel i hvert fald for de betydeligste vandværkers vedkommende.

Ligning (1) lader sig kun i specialtilfælde løse eksakt analytisk. I andre tilfælde lader tilnærmede, analytiske og numeriske løsningsmetoder sig anvende. I det følgende skal generelle egenskaber ved disse to slags løsninger kort omtales.

1.3. Analytiske løsningsmetoder

Analytiske løsninger til (1) kan findes under forudsætning af, at grundvandsmagasinet er homogent, og at de hydrauliske parametre er konstante i tid og rum. Grundvandsmagasinet kan strække sig i det uendelige eller være begrænset af en veldefineret og geometrisk simpel rand. I førstnævnte tilfælde er beregningerne enkle, mens løsningerne kan blive meget komplicerede, når grundvandsmaga-

sinet er begrænset. Her benyttes superpositionsprincippet, idet det begrænsede grundvandsmagasin overføres til et ækvivalent åbent magasin ved at anbringe et passende antal spejlboringer og superponere virkningerne fra disse.

Analytiske løsningsmetoder vil ofte vise sig at være utilstrækkelige, hvor store datamængder foreligger, da sådanne data sjældent kan udnyttes til fulde ved analytiske metoder. Her bliver matematisk-numeriske modeller et oplagt redskab. De analytiske metoder kan dog på enkel vis anvendes til en grov kontrol af datamaskinens beregninger.

1.4. Numeriske løsningsmetoder

De numeriske løsningsmetoder indebærer alle opstilling af en model, der diskretiserer (1) i x-y planen. De har derfor den fordel fremfor de analytiske, at en vilkårlig randgeometri samt en vilkårlig variation af de hydrauliske parametre kan tages i regning. Også de øvrige hydrologiske forhold såsom lækage og vandudveksling med overfladem agasiner kan variere fra punkt til punkt i modellen. Desuden kan grundvandets trykniveau i et meget stort antal boringer beregnes, ligesom der kan tages hensyn til en række forskellige hydrauliske betingelser langs randen. De hydrauliske betingelser langs områdebegrænsningen er af afgørende betydning, hvis sænkningerne udbreder sig helt ud til denne inden for den periode, hvori forholdene ønskes beskrevet.

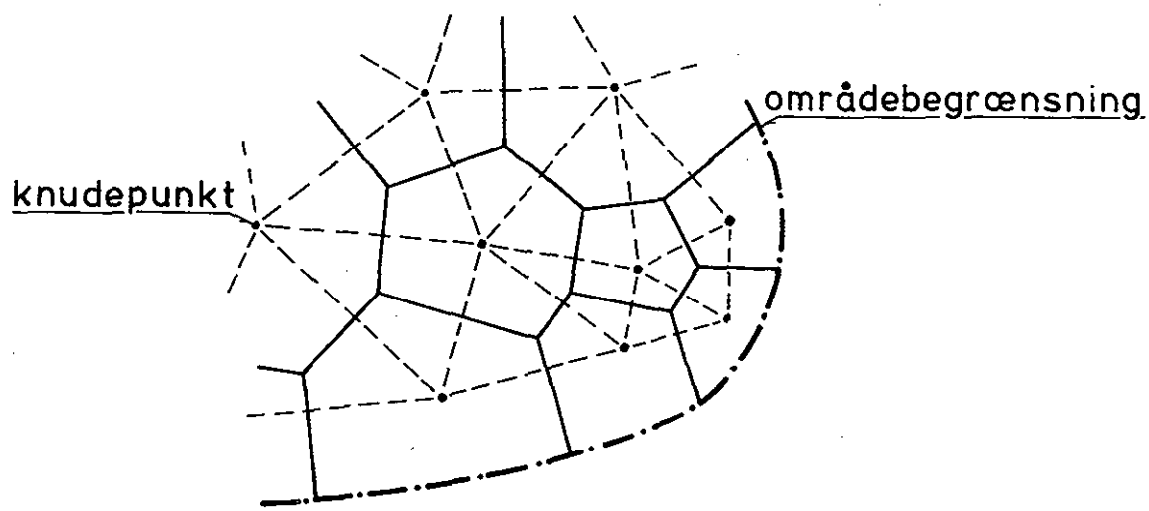
Det sker ofte, at den planlagte oppumpning involverer så stort et område, at modelområdet (der skal have endelig udstrækning) må afgrænses et sted, hvor ingen specielle geologiske eller hydrauliske forhold motiverer randens placering, og de hydrauliske forhold derfor vanskeligt lader sig bestemme. En sådan begrænsning må derfor tilstræbes lagt så langt borte fra oppumpningsstederne, at en mere eller mindre forkert hydraulisk randbetingelse ingen praktisk indflydelse får på det endelige resultat.

Ud over betingelser langs områdets ydre begrænsning fordrer en numerisk model kendskab til de hydrauliske parametre i hvert punkt, der foretages beregninger i. I områder med detaljeret viden om parametrene eller store gradienter i trykniveauet kan med fordel arbejdes med stor punkttæthed, mens punkterne i modellen anbringes

længere fra hinanden, hvor kendskabet til de hydrauliske forhold er sporadisk eller gradienten lille.

1.4.1. Tyson-Weber metoden

Denne løsningsmetode forudsætter en horisontal inddeling af det undersøgte reservoir i et system af polygoner. Grundprincipperne i den opbyggede model er beskrevet i [1]. Centralt beliggende i hver polygon ligger et knudepunkt, der repræsenterer en boring. Trykniveauet h i denne boring antages at være repræsentativt for trykniveauet i hele polygonen, og også magasintallet S betragtes som konstant inden for hver polygon. Endvidere samles hver polygons vandudveksling med overfladem agasinerne i én nettovandføring A·Q, hvor A er polygonarealet. Et typisk polygonnet er vist på figur 1.4.1.

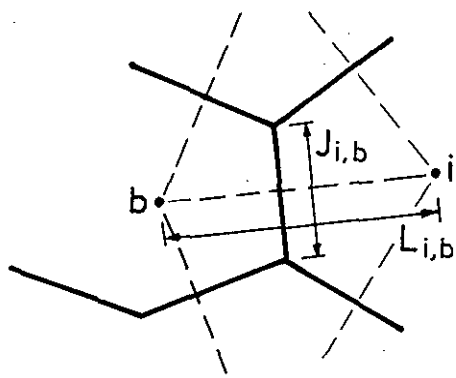


Figur 1.4.1 Polygonnet.

Den geometriske konstruktion af nettet foregår ved at forbinde eksisterende boringer med linjer (vist stiplet på figur 1.4.1), der udgør trekanter. Der tilstræbes et så regelmæssigt net som muligt, idet der kan indskydes tænkte boringer som hjørnepunkter for trekanter i områder med få brugbare boringer. Det ideelle net består af ligesidede trekanter med en boring beliggende i hver trekantspids. Polygonsiderne (fuldt optrukket på figur 1.4.1) konstrueres herefter vinkelret på forbindelseslinjerne mellem boringerne, og det tilstræbes, at knudepunkterne får en nogenlunde cen-

tral placering i polygonerne. I idealtilfældet bliver polygonerne regulære sekskanter; men kan det blot opnås, at alle trekanter i nettet af boringer bliver spidsvinklede, kan polygonsiderne dannes som midtnormaler til forbindelseslinjerne, og knudepunkterne er derved sikret en central placering.

Det virkelige strømningsbillede i grundvandsmagasinet tilnærmes i modellen med grundvandsstrømme langs forbindelseslinjerne, altså vinkelret ind gennem polygonsiderne. Til hver polygonside eller hver forbindelseslinje er knyttet en transmissivitet T, således at vandudvekslingen mellem to nabopolygoner kan beskrives ved Darcy's lov, som er forudsat gældende ved udledning af venstre side af (1). Inden for hver polygon kan derfor optræde forskellige T-værdier, hvilket giver mulighed for at tage højde for selv mindre, lokale variationer i såvel permeabilitet som mægtighed af den vandførende formation.



Figur 1.4.2 Vandudveksling mellem polygoner

Grundvandsstrømmen mellem polygon i og b (se figur 1.4.2) kan ved brug af Darcy's lov beregnes til

$$Q_{i,b} = T_{i,b} \frac{h_i - h_b}{L_{i,b}} J_{i,b} \qquad (2)$$

hvor J og L er henholdsvis polygonsidelængde og afstand mellem knudepunkter. T angiver den lokale transmissivitet og h grundvandets trykniveau. Da J og L er geometriske størrelser, og T antages kendt, kan disse størrelser samles til én størrelse Y, der angiver ledningsevnen mellem to knudepunkter i og b

$$Y_{i,b} = T_{i,b} \frac{J_{i,b}}{L_{i,b}} \tag{3}$$

Den samlede tilstrømning fra det øvrige magasin til polygon b er da $\sum_i Q_{i,b}$, hvor summationen udstrækkes over alle tilgrænsende polygoner. Da vandbalancen i hver polygon til stadighed skal være opfyldt, må den samlede tilstrømning fra nabopolygonerne balancere netto-oppumpningen fra knudepunkt b på nær et bidrag, der hidrører fra ændringen i magasinindholdet inden for polygon b. Betragtes et lille tidsrum Δt, og antages trykniveauet at ændre sig Δh inden for dette tidsrum, kan betragtningen ovenfor udtrykkes i en endelig-differens tilnærmelse til (1),

$$\sum_i Q_{i,b} = A_b S_b \frac{\Delta h_b}{\Delta t} + A_b Q_b \tag{4}$$

hvor S_b betegner magasintallet i polygon b.

I et net bestående af N polygoner fås således et ligningssystem bestående af N ligninger med N ubekendte trykniveauer for hvert betragtet tidsskridt. Da h_b jfr. (2) indgår i beregningen af venstre side af (4) og også findes på højre side af lighedstegnet, må ligningssystemet løses implicit. I det udviklede EDB-program anvendes en modifikation af Gauss-Seidel's iterative metode, der er yderst velegnet til datamat-beregning. Ligningssystemet løses én gang for hver Δt sekunder, og da der teoretisk set kan vælges vilkårligt små tidsskridt, er det muligt at simulere et detaljeret forløb af trykniveauernes tidslige variation i de udvalgte boringer.

Den ovenfor beskrevne programalgoritme er afprøvet i [2], hvor der er foretaget en række testkørsler af den numeriske løsningsmetode på simple modeller. Disse er blevet opbygget således, at forudsætningerne for anvendelse af analytiske modeller er opfyldt næsten eksakt. Sammenligning af resultaterne opnået på disse to uafhængige måder viser overordentlig god overensstemmelse mellem den numeriske simulering og de teoretisk rigtige værdier.

I denne forbindelse kan det være på sin plads at nævne, at den faktisk målte sænkning i en pumpeboring ikke lader sig simulere med Tyson-Weber modellen eller med nogen anden numerisk grundvandsmodel, selv når der ses bort fra indstrømningstabet i boringen [18]. Dette skyldes, at diskretiseringen i planen er for grov

til at kunne beskrive forholdene i en afstand af størrelsesorden 0.1 m fra pumpeboringen. Den simulerede sænkning i et knudepunkt, hvorfra der pumpes, kan dog til gengæld sammenlignes med den målte sænkning i observationsboringer i umiddelbar nærhed af pumpeboringen.

1.5. Opbygning af grundvandsmodel over Suså-Vendebæk området

En model af et grundvandsmagasin er sammensat af 3 hovedkomponenter, nemlig:

a) En geologisk del, som beskriver de aktuelle geologiske formationers geometri.
b) En hydraulisk del, som tillægger de enkelte formationer fysiske og hydrauliske egenskaber samt beskriver vekselvirkningen mellem dem.
c) En foreskreven rand, der angiver modellens udstrækning i planen, og som tillige indeholder en beskrivelse af modellens samvirken med omgivelserne uden for modelområdet.

Modellen opstilles i første omgang på basis af eksisterende data. Geologiske og hydrogeologiske informationer indhentes først og fremmest på DGU's borearkiv, hvor grundmaterialet til en hydrogeologisk kortlægning er samlet. På basis heraf kan den geologiske del formuleres, ligesom modellens rand kan fastlægges i hovedtræk.

Herudover vil de fleste større vandforsyninger råde over et arkiv med pejlinger af trykniveauet i grundvandsmagasiner langt tilbage i tiden fra observations- og indvindingsboringer samt i mange tilfælde tillige pejledata fra prøvepumpninger udført i forbindelse med etablering og eventuel udvidelse af værkerne. Data fra sådanne prøvepumpninger kan danne grundlag for en bedømmelse af størrelsen af de hydrauliske parametre, der indgår i modellen.

Disse data er af uhyre stor betydning for undersøgelsens videre forløb. En tilbundsgående analyse af eksisterende data vil i almindelighed spare tid og penge og vil tillige ofte give informationer, der ellers ikke ville kunne fremskaffes.

Hertil kommer at historiske data er uundværlige ved modelundersøgelser af enhver art, idet alle modeller skal kalibreres, før

de kan anses for at være repræsentative, og kalibreringer foretaget på en lang observationsserie vil altid give en bedre og mere pålidelig model af området end en kalibrering baseret på en kort periode, f.eks. en prøvepumpning fra en enkelt boring af 1 uges varighed.

Først når eksisterende data er undersøgt, bør der tages stilling til arten og omfanget af videre undersøgelser for at skaffe supplerende data til modellen.

I de følgende afsnit vil arten og anvendelsen af indsamlede data i Suså-Vendebæk området blive beskrevet.

1.5.1. Geologi og hydrogeologi

Geologiske og hydrogeologiske informationer i området er som nævnt tidligere primært baseret på DGU's borearkiv. Desuden er anvendt pejlemateriale fra KV's arkiver, som er grundlaget for trykniveaukortet (bilag 2) og kortet over årstidsfluktuationer (bilag 6). De geologiske forhold i Regnemark-området og nordpå er ridset op i KV's rapport over Regnemark-området [3].

De geologiske og hydrogeologiske forhold i Suså-Vendebæk området er udførligt behandlet i DGU's rapporter [4] og [5] samt i [16], hvortil henvises for en tilbundsgående beskrivelse. Her skal kun gives en oversigt over de forhold, som er relevante i forbindelse med nærværende undersøgelse. Basisdatakortet, bilag 1 i denne rapport, er et genoptryk af bilag 2 i [4].

1.5.1.1. Grønsandsaflejringerne

Den væsentlige produktive formation i Suså-Vendebæk området er de paleocæne aflejringer. Basisdata-kortet (bilag 1), som dækker den sydlige del af det undersøgte område, viser, at de paleocæne aflejringer findes til stor dybde med mægtigheder på over 100 m i den centrale og vestlige del af området. I det nordlige område, som ikke er med på kortet, genfindes paleocænet ligeledes med stor mægtighed [3].

De paleocæne aflejringer består af vekslende lag af grønsand, grønsandskalk, -ler og -mergel. Det vides ikke med sikkerhed, hvorledes de enkelte lag indgår i det integrerede strømningsmønster, men de foretagne undersøgelser i området viser, at grøn-

sandsaflejringernes permeabilitet varierer flere dekader i undersøgelsesområdet.

De paleocæne aflejringer har bassinstruktur, idet paleocænet klinger ud mod syd og øst og erstattes af danskekalk, som ellers underlejrer paleocænet. Mod syd følger grænsen mellem de to formationer i grove træk en øst-vest-gående linje fra Gunderslevholm til Dalby, hvor grænsen drejer mod nord og her stort set følger en nord-syd-gående linje, som afgrænser undersøgelsesområdet mod øst.

1.5.1.2. Prækvartærets trykniveau

På bilag 2 er vist trykniveauvariationerne i grønsandsaflejringerne og i den tilgrænsende danskekalk pr. august 1974. Samtlige pejlinger er baseret på KV's boringer. Da mange boringer står i både danien og paleocæn især i Regnemark-området, er det ikke muligt at skelne skarpt mellem trykniveauerne fra disse to formationer. Trykniveaukortet skal derfor læses som et kort over prækvartærets trykniveau med en vis usikkerhed i kurvetegningen, især i grænseområderne mellem paleocæn og danien.

I den centrale del af Suså-Vendebæk området, hvor transmissiviteten er høj, har trykniveauet et relativt fladt relief, mens forløbet bliver mere uroligt i danskekalken mod øst og syd delvis på grund af lavere transmissivitet. Den drænende effekt af vandløbene afspejles tydeligt i trykniveaukurvernes forløb, især langs Suså fra Farendløse til Næsby samt langs vandløbene ved Regnemarkværkets kildepladser.

Langs Vendebæk og især Suså observeres trykniveauet at stige med dybden i boringerne. Dette skyldes sandsynligvis, at vandløbenes afdræning af de øverste paleocæne lag har sænket trykniveauet her i forhold til de dybereliggende lag. Der kan tillige være tale om en horisontal lagdeling i paleocænet, som er i stand til at opretholde et stigende trykniveau med dybden, men da trykspringene hovedsageligt forekommer langs vandløb, må dræningseffekten antages at være afgørende.

Mod vest og syd forekommer kraftige gradienter, hvilket skyldes meget lave transmissiviteter i paleocæn og danien. Et tydeligt eksempel herpå ses nord for Valsømagle, hvor trykniveauet falder

fra kote +44 til +26 over en relativt kort strækning, og hvor bor KV nr. 1123 er upåvirket af 10 års indvinding til Regnemarkværket. (Se sænkningskortet, bilag 5).

Mod syd ses en skarp afgrænsning i trykniveau mellem paleocæn og danien, mens overgangen er jævn mod øst ved Haslev-Terslev-Giesegård, hvilket her kan tyde på en hel eller delvis kontakt de to formationer imellem.

1.5.1.3. Lækageforhold

Overalt i det undersøgte område er de paleocæne formationer dækket af istidsaflejringer bestående af moræneler og diluvialsand og -grus med moræneler som den dominerende bjergart. Mægtigheden af istidsaflejringerne varierer i den centrale del af Suså-Vendebæk området fra ca. 5 m ved vandløbene til 25-40 m borte fra vandløbene. Større sammenhængende sekundære grundvandsmagasiner forekommer ikke i den centrale del, men begrænsede magasiner findes dog, f.eks. sydøst for Haslev, øst og syd for Engelstofte samt omkring Tybjærg.

Under ingen af de udførte prøvepumpninger i den centrale del [4] er der observeret sikre tegn på lækage. Dette bekræfter, at de sekundære grundvandsmagasiner har lokal karakter, og viser tillige, at der ikke kan forventes væsentlig lækage til paleocænet fra det underlejrede danien.

Helt anderledes stiller sagen sig i den nordlige del af området omkring Regnemark. Her er paleocænet dækket af mægtige istidslag [3] med hyppig forekomst af tykke sandlag. Prøvepumpninger på KV's boringer i dette område viser selv under korttidsprøvepumpninger (6-24 timer) mange steder tydelige tegn på lækage, som tilskrives istidslagene. En grov overslagsberegning vil vise lækagens effekt. Regnes sænkningstragten (bilag 5) at have udbredt sig over 700 km^2 med en gennemsnitssænkning på 2 m, og regnes magasintallet optimistisk til 10^{-3}, fås et vandvolumen på $1.4 \cdot 10^6$ m^3, mens den oppumpede vandmængde er ca. $90 \cdot 10^6$ m^3.

Laves en tilsvarende beregning for 4-dages prøvepumpningen (bilag 3) i det centrale Suså-Vendebæk område, vil sænkningstragtens volumen balancere oppumpningen på 170.000 m^3 inden for 10%, som kan tilskrives unøjagtighed i beregningen.

Bortset fra lokale forekomster i den sydlige del af modelområdet (Haslev, Tybjærg) kan den centrale del af Suså-Vendebæk området altså regnes uden lækage, mens den nordlige del af modelområdet omkring Regnemark kan anses for at være lækagegivende. De områder, der i modelberegningen er regnet lækagegivende, er vist på bilag 8.

1.5.2. Hydrauliske parametre

De hydrauliske parametre, der er nødvendige til modelopstillingen, er transmissiviteten T, magasintallet S samt lækagekoefficienten P'/m'. Disse størrelser kan med rimelig nøjagtighed kun bestemmes ved hjælp af prøvepumpninger med hyppige pejlinger, således at et tidsforløb kan optegnes. På basis af pumpeboringen alene kan kun T bestemmes, mens bestemmelsen af S og P'/m' kræver pejlinger i observationsboringer.

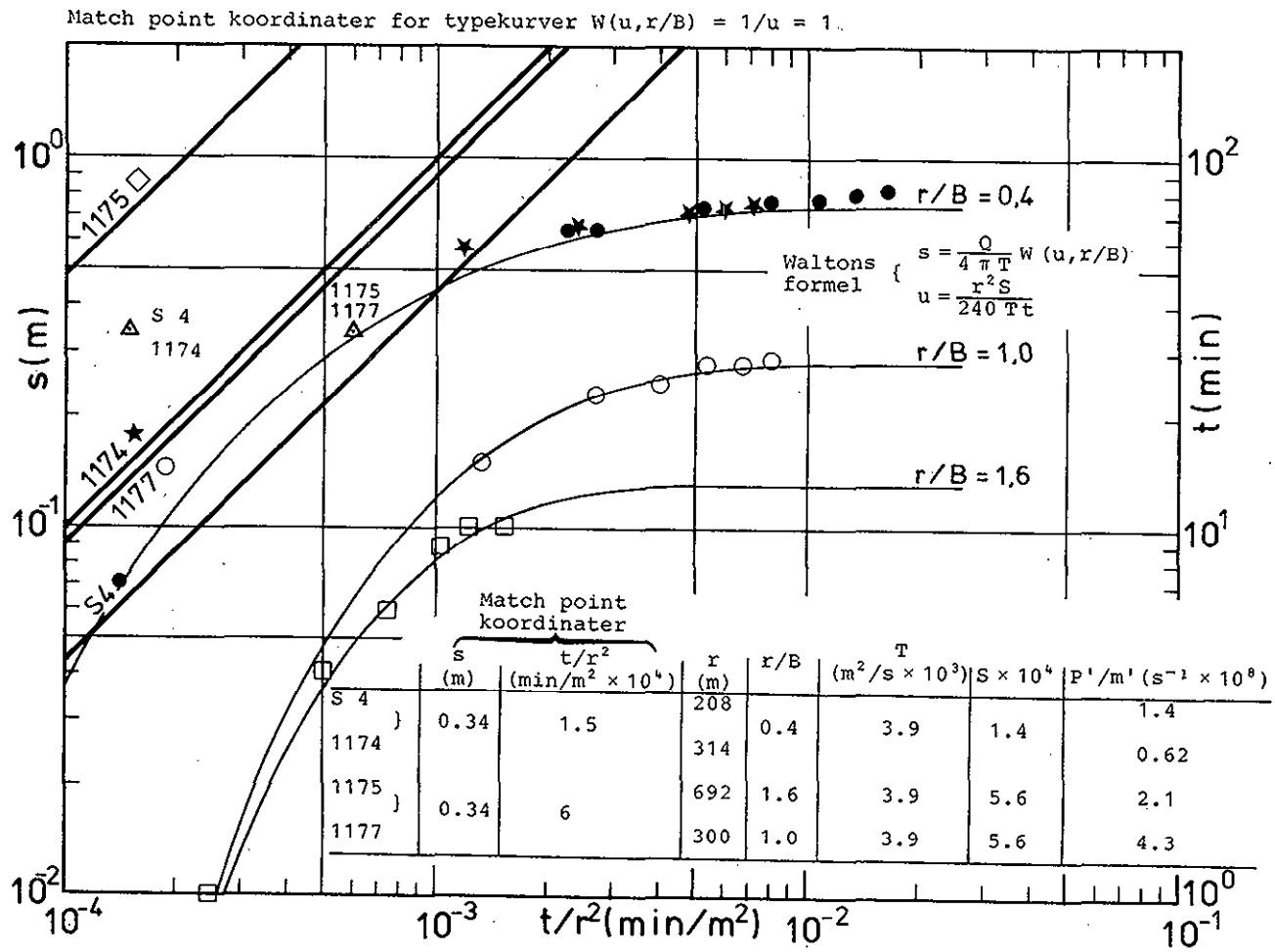
De hydrauliske parametre i det undersøgte område er alle bestemt på basis af prøvepumpninger udført af KV på egne boringer.

I den centrale del af Suså-Vendebæk området er benyttet prøvepumpningsresultater fra undersøgelserne udført af KV i 1974-75 i samarbejde med DGU. Prøvepumpningerne er beskrevet og tolket i [4], og værdierne af de hydrauliske parametre er taget herfra og anvendt som foreløbige parametre i nærværende model.

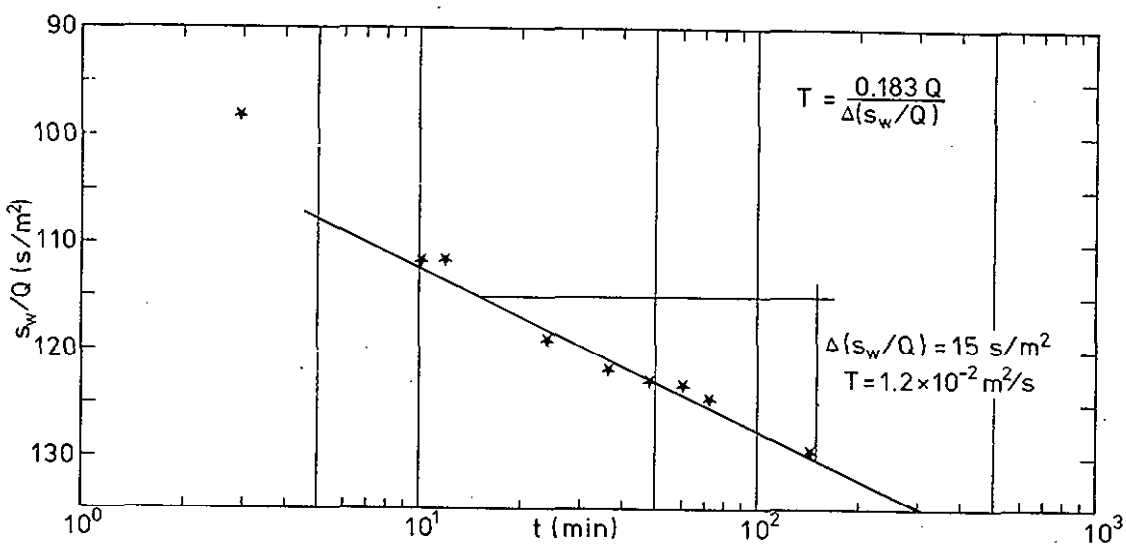
I området omkring Regnemarkværkets kildepladser er gennemgået og analyseret ca. 50 prøvepumpninger udført i 1958. Prøvepumpningerne har gennemgående været af 12 timers varighed, ingen dog over 24 timer.

Der er udført to typer af prøvepumpninger, nemlig:

a) Prøvepumpninger med konstant kapacitet. Disse prøvepumpninger er de almindelige, hvor vandet pumpes fra boringen, og sænkningsforløbet i boringer og observationsboringer registreres.
b) Prøvepumpninger med konstant trykniveau i "pumpeboringen". Disse prøvepumpninger er foretaget, hvor boringerne har haft overløb, og ved hjælp af en målekasse er trykniveauet i boringen fastholdt kunstigt, og den tidslige variation af kapaciteten er registreret.



Figur 1.5.1. Eksempel på beregning af hydrauliske parametre. Pumpning med konstant kapacitet Q = 60,1 m³/h fra boring Svenstrup 6.



Figur. 1.5.2. Eksempel på beregning af hydrauliske parametre. Pumpning med fastholdt sænkning s_w = 2.12 m på boring Vigersted 28.

Eksempler på beregningen af de hydrauliske egenskaber er vist på figur 1.5.1 og 1.5.2. I det førstnævnte tilfælde er sænkningsdata i en observationsboring analyseret ved hjælp af Walton's typekurve [18], mens kapacitetsdata er analyseret ved hjælp af en metode angivet i [6].

De beregnede værdier for de enkelte kildepladser fremgår af tabel 1.5.1. Da disse kildepladser ligger langt fra placeringen af den påtænkte vandindvinding i Suså-Vendebæk området, er et detaljeret kendskab i dette område ikke påkrævet, hvorfor der til modelleringen er anvendt gennemsnitlige værdier af de hydrauliske parametre inden for hver kildeplads.

En del af de angivne P'/m'-værdier er delvis skønnede, idet det ikke altid har været muligt at bestemme P'/m' eksakt. Derfor er der sammenlignet med resultater fra andre kildepladser med tilsvarende geologi, hvor P'/m' har kunnet bestemmes bedre. Under de senere kørsler med grundvandsmodellen er foretaget justeringer af værdierne.

Kildeplads	Transmissivitet $T \cdot 10^3 (m^2/s)$	Magasintal $S \cdot 10^4$	Lækagekoefficient $P'/m' \cdot 10^9 (s^{-1})$
EJBY	4	2	1
RAVNESHAVE	8	2	5
ALMSGÅRD	8	6	7
GUMMERSMARKE	5	4	0.8
KIMMERSLEV	10	1	1
NR. DALBY	8	5	5
SLIMMINGE	9	6	1
SVENSTRUP	4	5	20
VIGERSTED	10	7	10
BØSTOFTE	7	5	5
VALSØMAGLE	5	5	1

Spanager kildeplads er ikke medtaget i tabellen, da boringerne her kun udnytter danskekalken.

Tabel 1.5.1 Oversigt over gennemsnitlige hydrauliske parametre ved kildepladserne til Regnemarkværket.

I områdets nordlige og vestlige dele er boretætheden lille, og fra boringerne foreligger ikke resultater fra kontrollerede prøvepumpninger, men kun oplysninger om specifik kapacitet, hvorfor der her kun kan bestemmes en tilnærmet værdi af transmissiviteten, mens magasintal og lækagekoefficient må skønnes. Et eventuelt fejlskøn vil dog ikke influere væsentligt på resultaterne angående den påtænkte vandindvinding på grund af den store afstand til det centrale Suså-Vendebæk.

I den centrale del af Suså-Vendebæk området, hvor den kommende vandindvinding tænkes iværksat, måles meget høje T-værdier, 0.03-0.06 m^2/s, og lokalt kan værdien overstige 0.1 m^2/s, mens T-værdierne mod øst, hvor paleocænet klinger ud, er af størrelsesorden 0.01 m^2/s.

Mod vest langs en linje fra Glumsø i nord til Gelsted i syd forekommer et kraftigt fald i paleocænets trykniveau betinget af, at grønsandsaflejringerne er udviklet som en ler-mergelbjergart med meget lille permeabilitet. Lignende forhold gør sig gældende i den nordlige del af området fra Skjoldenæsholm over Valsølille til Allindemagle. Prøvepumpninger på boringer i disse områder viser klart en meget lille transmissivitet af størrelsesorden 10^{-5} m^2/s, og årstidsfluktuationerne er meget små svarende til lille transmissivitet og/eller stort magasintal, som netop er karakteristisk for ler.

1.5.3. Randbetingelser

Efter at det indre af området er foreløbigt fastlagt hydraulisk, kommer nu bestemmelsen af randen. Der er to typer af begrænsninger, der normalt anvendes i grundvandsmodeller, begrænsninger med fastholdt trykniveau eller rande med kendt gennemstrømning, hvoraf impermeable rande udgør et specialtilfælde med gennemstrømningen 0. Områder med fastholdt trykniveau er ikke fundet i det aktuelle område, men er dog anvendt som en tilnærmelse.

I DGU's rapport [4] er angivet en begrænsning, som er bestemt dels ud fra udførte prøvepumpninger, og dels ad geologisk vej. Det drejer sig om områdets sydlige og østlige del, hvor paleocæn og danien grænser op mod hinanden. Denne begrænsnings forløb søges eftervist og dens videre forløb fastlagt i øst. Endvidere skal om-

rådet afgrænses mod vest og nord af begrænsninger med rimelige hydrauliske betingelser.

Sådanne begrænsningers forløb kan med rimelig sikkerhed bestemmes ved hjælp af prøvepumpninger af længere varighed. Til dette formål er rekvireret materiale fra Storstrøms og Vestsjællands amter samt fra KV. Efter en gennemgang af materialet er der foruden KV's prøvepumpning i maj 1974 fundet egnede prøvepumpninger ved Tybjerglille og Pindsobro, udført af I. Krüger A/S, samt en samlet prøvepumpning på Regnemarkværkets kildepladser. Endvidere er undersøgt sænkningsforløbet i alle observationsboringer, der er påvirket fra Regnemarken siden værkets start i 1964/65, og endelig er årstidsfluktuationer for alle boringer i området analyseret.

1.5.3.1. Prøvepumpning i Suså-Vendebæk området

Prøvepumpningen blev udført i perioden 27.-31.5.1974 af KV for at undersøge muligheden af at oppumpe ca. 20 mill. m^3/år fra det centrale Suså-Vendebæk. Der blev pumpet fra kildepladserne Aversi, Ørslev, Hjælmsølille, Mulstrup og Tybjerglille med en samlet gennemsnitlig oppumpning på ca. 1650 m^3/h og pejlet i de eksisterende observationsboringer i området. De observerede sænkninger er afbildet på sænkningskortet, bilag 3.

Sænkningskurverne viser her, at mod vest og mod nord ved Ringsted aftager sænkningen gradvist, indicerende at grundvandsmagasinet er åbent i disse retninger. Mod syd ved Torpe standses sænkningstragten brat ved overgang til danien, og denne bratte overgang tolkes som en impermeabel grænse. I øst er udbredelsen større end mod syd, men sænkningstragtens relativt kraftige hældning kan skyldes, at transmissiviteten i paleocænet falder her. Prøvepumpningens varighed har ikke været tilstrækkelig til, at modelområdets østlige begrænsning bliver berørt.

Den interne grænse ved Mulstrup ses tydeligt, idet der er et kraftigt spring i sænkning over denne. Kalibreringskørslerne, som omtales senere, har vist, at denne interne grænse ikke skal hænge sammen med den østlige begrænsning, men at der skal tillades en transport af vand øst om grænsen.

Under de af KV og DGU udførte prøvepumpninger [4] i Suså-Vendebæk området blev der påvist eksistensen af flere negativ hydrologiske

grænser inde i selve området. Undersøgelsen ved Mulstrup [5] viste tillige eksistensen af den nævnte vinkelrette grænse, se bilag 3, hvis tilstedeværelse kan anes på flere af bilagene til nærværende rapport. Trykniveaukurver, sænkningskurver og kurver over årstidsfluktuationen vil udvise et fladt relief i den kvartplan, som afgrænses af de to hydrologiske grænser (bilag 2, 5 og 6).

De øvrige interne grænser kan ikke umiddelbart fastlægges, og i modelarbejdet er derfor regnet med, at disse har så lokal karakter, at der kan ses bort fra deres eksistens.

1.5.3.2. Prøvepumpning ved Tybjerglille

Prøvepumpningen ved Tybjerglille [17] blev udført den 13.7. - 23.11.1970 for at undersøge mulighederne for at skaffe vand til Næstved kommune fra dette område. Som pumpeboringer (bilag 4) blev anvendt boringerne T1-T4, som alle har filter i paleocæn. Boringerne kørte i kontinuert drift med en oppumpning på 320 m^3/h indtil den 21.9., hvor bor T1 og T2 blev stoppet. Efter dette tidspunkt stiger vandstanden, fordi to boringer retablerer, og sænkningerne vil i en periode opføre sig, som om ligevægt er opnået. Senere vil vandstanden igen falde, når de to boringer har retableret tilstrækkeligt.

På grund af disse forhold er valgt tidspunktet 21.9. til at undersøge sænkningstragtens udbredelse, og resultatet af den gennemførte undersøgelse af pejleboringernes sænkningsforløb er vist på sænkningskortet, bilag 4. Sænkningskurverne er i dette område optegnet med 0.1 m ækvidistance, da pejleboringernes tæthed er stor nok til at forsvare dette.

Kortet viser, at sænkningstragten udviser en tydelig tendens til at udbrede sig mod Aversi og være meget flad i denne retning i overensstemmelse med, at transmissiviteten er meget høj her i forhold til den øvrige del af Tybjerg-området. Mod vest og syd derimod bliver sænkningstragten stejl og får mindre horisontal udbredelse. Mod vest skyldes dette, at de paleocæne aflejringer har et kraftigt fald i permeabilitet og dermed transmissivitet. Mod syd er der en klar tendens til, at sænkningstragten ikke udbreder sig over den indtegnede impermeable grænse, som er tegnet ind efter de målte sænkninger, men som tillige nøje følger den geologiske græn-

se mellem paleocæn og danien. Da prøvepumpningen til det benyttede tidspunkt har varet 9 uger, og der ikke er konstateret påvirkning over grænsen, er det rimeligt at regne denne for at være effektivt tæt i grundvandsmodellen.

1.5.3.3. Prøvepumpning ved Pindsobro

Næstved kommunes boringer ved Pindsobro står alle i danien, og ved pumpning fra disse boringer fås en uafhængig kontrol af den sydlige grænses impermeable karakter.

Prøvepumpningen [17] blev udført på boringerne 15, 16, 19 og 20 i perioden 22.2. - 14.6.1971. Kapaciteten var 80 m^3/h for alle boringer i de første tre døgn, hvorefter kapaciteten nedsattes til 60 m^3/h pr. boring. Med denne ydelse kørtes i kontinuert drift indtil 25.5., hvor bor 20 standsedes, og de øvrige tre boringer nedsattes til 50 m^3/h. På grund af disse forhold er på bilag 4 vist sænkningstragtens udbredelse pr. 25.5. Størrelsen af sænkningerne skal tages med et vist forbehold, da trykniveauet i prøvepumpningsperioden har en nedadgående drift hidrørende fra årstidsvariation.

De optegnede sænkningskurver med ækvidistance 0.5 viser, at danienkalken er temmelig homogen i området, da sænkningskurverne har ret konforme forløb. Sammenlignes med basisdatakortet, bilag 1, ses det, at der ikke forekommer sænkninger over grænsen mellem danien og paleocæn i boringer, der udnytter paleocæn. Det er derfor en rimelig antagelse, at skillelinjen mellem paleocæn og danien langs områdets sydlige begrænsning regnes for at være en impermeabel rand i grundvandsmodellen. Forløbet og karakteren af randen mod øst og nord er undersøgt ved hjælp af pumperesultater fra Regnemarkværket.

1.5.3.4. Prøvepumpning ved Regnemark

I forbindelse med etablering af Regnemarkværket blev der i perioden 7.-31.10.1958 udført en samlet prøvepumpning på samtlige kildepladser [3]. Sænkningstragten har ved denne prøvepumpning dækket et stort område og kan være velegnet til at fastlægge randen langs en del af modellens østlige begrænsning.

Kildepladserne udnytter både kvartær, paleocæn og danien på følgende måde:

Paleocæn:	Valsømagle
	Bøstofte
	Vigersted
	Svenstrup
	Kimmerslev
	Slimminge
	Almsgård
Danien:	Spanager
Paleocæn og danien:	Ravneshave
	Gummersmarke
	Ejby
Kvartær:	Nr. Dalby.

Som følge af denne udnyttelse af forskellige grundvandsmagasiner kan det ikke med sikkerhed siges, hvorledes sænkningerne fordeler sig på de enkelte magasiner, men en kvalitativ vurdering af prøvepumpningsresultaterne kan dog umiddelbart foretages.

Af bilag 4 fremgår de målte sænkninger ved pumpeperiodens slutning. De enkelte kildepladsers placering fremgår tydeligt, idet sænkningskurverne her helt eller delvis lukker sig. De optegnede sænkningskurver viser igen, at transmissiviteten er stor i den centrale del af Suså-Vendebæk området, hvor sænkningstragten trækker ned. Mod øst standser sænkningstragten brat, fordi paleocænet klinger ud, og kalkens transmissivitet er betydeligt mindre end paleocænets. Mod nord bliver sænkningstragten stejlere end mod syd afspejlende et fald i transmissiviteten, og i den vestlige del er dette endnu mere udtalt, hvor bor 1117 og 1108 ikke er påvirket på trods af deres beliggenhed nær ved Valsømagle kildeplads. Den i DGU-rapporterne angivne vinkelrette grænse øst for Ringsted afspejler sig ikke på dette sænkningskort, da sænkningstragten vil være i stand til at bevæge sig både ind i og uden om det område, grænserne afskærer.

1.5.3.5. Indvinding ved Regnemark.

Ved fastlæggelsen af områdets rand er tillige anvendt pejleresultater i alle KV's boringer over en længere årrække i det aktuelle område. Disse boringer er nemlig for en stor dels vedkommende påvirket af Regnemarkværkets oppumpning, som påbegyndtes i 1964-65.

Foruden Regnemarken har også Ringsted kommunale værker sænket vandstanden i området siden begyndelsen af fyrrerne, og denne påvirkning er søgt elimineret ved at EDB-tegne tidsforløbene i alle ca. 175 pejleboringer og på disse kurver grafisk fratrække den indflydelse, som Ringsted vandværk skønnes at have forårsaget. De beregnede sænkninger er således behæftet med en vis usikkerhed, men da området har stor boretæthed, vil den frembragte sænkningstragts udbredelse være rimeligt godt bestemt. Sænkningerne er beregnet pr. 1.1.1976, og på basis heraf er fremstillet et sænkningskort, som vist på bilag 5.

Heraf fremgår det, at Regnemarkværket har produceret sænkninger i hele den paleocæne del af Suså-Vendebæk området helt ned til den sydlige grænse mellem paleocæn og danien. Endvidere ses det, at den østlige geologiske grænse mellem paleocæn og danien rimeligt nøje følger sænkningstragtens udbredelse med den udviskning af grænsen, der forekommer, da der jo også pumpes fra danien. Det samme er tilfældet mod syd, hvor oppumpningen fra Pindsobro kan spores.

Mod nord breder sænkningstragten sig ikke så langt som mod syd, hvilket igen viser, at transmissiviteten er mindre nord for end syd for Regnemarkværket. Forskellen udviskes dog i nogen grad af, at der forekommer lækage, som bremser sænkningstragtens udbredelse mere i den nordlige del end i den sydlige.

Mod nordvest og vest ses sænkningstragten at blive meget stejl og standse brat ved boringerne 1117 og 1123. Da disse to boringer står i paleocæn, kan dette kun skyldes et meget markant fald i transmissivitet/permeabilitet. Det er derfor naturligt at afgrænse modelområdet her og at tildele dette område T-værdier af størrelsesorden 10^{-4} m^2/s.

Mod nord gør ingen særlige hydrauliske forhold sig gældende. Her vælges en impermeabel rand beliggende så langt væk fra de fremtidige indvindingssteder, at randens karakter praktisk taget ingen indflydelse vil få på sænkningerne i den øvrige del af modelområdet.

1.5.3.6. Årstidsfluktuationer i pejleboringer i prækvartær

Endelig er fremstillet et kort over årstidsfluktuationernes størrelse i prækvartæret (bilag 6). I alle de KV-boringer, der er tilstrækkelig gamle, er målt den gennemsnitlige amplitude over året, d.v.s. forskellen mellem årsmaximum og årsminimum i trykniveauet. Hvor det har været muligt, er benyttet en værdi fra før Regnemarkværket startede, da en oppumpning vil øge amplitudernes størrelse. De angivne amplituder er selvfølgelig behæftet med en vis usikkerhed forårsaget af ikke-periodiske effekter i tidsforløbet, men de regionale kurveforløb må anses for at være i det væsentlige korrekte.

Kurvebilledet er præget af 3 maxima. Det nordligste ved Borup, det mellemste ved Juellund og det sydligste ved Haslev. På grund af manglende geologiske kort kan kun det nævnte maximum ved Haslev forklares. Her findes nemlig udstrakte sandmagasiner indlejret i moræneleret over paleocænet, og da sandmagasinernes trykniveau er højere end paleocænets, vil der foregå en lækage-strømning fra sand til paleocæn. Denne strøm vil variere over året, da trykniveauforskellen mellem de to magasiner varierer, og netop hvor lækage-strømmen foregår, vil amplituden være størst. Med voksende afstand fra lækagestedet vil amplituden mindskes, hvilket tydeligt ses. Noget tilsvarende kan formodes at være gældende for de to andre maxima.

Der er en tydelig sammenhæng mellem trykniveaukortet, bilag 2, og kortet over årstidsfluktuationer, bilag 6. Hvor der er maxima på det ene kort, haves også maxima på det andet, og der vil almindeligvis forekomme sandlag over prækvartæret indicerende et nedsivningsområde. Forekommer der depressioner i trykniveauet, vil der tillige findes små årstidsvariationer. Dette ses tydeligt ved Køge Å, Vigersdal Å, Suså og Tryggevælde Å, hvor der forekommer minima, hvilket viser, at vandløb, der har direkte eller indirekte hydraulisk forbindelse med grundvandsmagasinet, dæmper fluktuationen. Dette ses at være rigtigt ved at betragte det ekstreme tilfælde, hvor vandløbene har uendeligt magasin og direkte forbindelse til grundvandsmagasinet. I dette tilfælde vil årstidsfluktuationens amplitude være 0 ved vandløbene.

Det mest interessante i forbindelse med en bestemmelse af randens karakter fremkommer ved en nærmere undersøgelse af de to maxima

ved Juellund og Haslev. Ved Juellund strækker det sig nemlig over begge sider af grænsen mellem paleocæn og danien og er tilsyneladende upåvirket af denne geologiske grænses tilstedeværelse. Da der ved Juellund tillige er højt trykniveau, er der altså her mulighed for en transport af vand tværs over den geologiske grænse.

1.5.4. Konstruktion af polygonnet i Suså-Vendebæk området

Resultaterne vedrørende de hydrogeologiske forhold i afsnit 1.5.1, 2 og 3 ligger til grund for konstruktionen af modelområdets begrænsning, der er angivet på bilag 7. En betragtning af grænsernes forløb viser, at disse dels er hydraulisk og dels geologisk bestemte. F.eks. er modelområdets sydlige afgrænsning både fastlagt ved prøvepumpninger og ved analyse af de geologiske forhold på bilag 1, mens den østlige grænse hovedsagelig er baseret på de geologiske basisdata. Mod vest og nord er der tale om en praktisk begrænsning af modelområdet, der kun tildels har geologisk baggrund (faldende transmissivitet). Da prøvepumpningerne tyder på, at randen flere steder har impermeabel karakter, anvendes dette som en første antagelse mod vest og nord, selv om denne antagelse kun delvis er sandsynliggjort i det foregående. Den indre 90-graders grænse ved Mulstrup, som er påvist i [5], er også medtaget i modellen, således at knudepunkter på hver sin side af grænsen ikke er forbundet og vandtransport derved forhindret.

Polygonnettet, over hvilket grundvandsmodellen i Susåens opland er opbygget, fremgår af bilag 7. Konstruktionen har fulgt retningslinjerne omtalt i afsnit 1.4.1, og det ses, at det de fleste steder er lykkedes at gøre trekanterne i nettet af boringer spidsvinklede, hvilket har lettet den geometriske konstruktion. Ved fastlæggelse af knudepunkternes placering er primært anvendt boringer, der med sikkerhed står i paleocæne aflejringer, og ved disse er angivet boringens nummer i KV's arkiv. Boringerne på de potentielle kildepladser - Ørslev, Aversi, Hjælmsølille, Vetterslev, Mulstrup og Tybjerglille - er samlet i grupper på op til 4 boringer pr. knudepunkt og er på bilag 3 angivet ved forbogstavet i kildepladsens navn efterfulgt af boringernes lokale numre. Visse steder med lille boretæthed er af konstruktionsmæssige grunde indføjet knudepunkter, der ikke repræsenterer boringer. Dette gælder f.eks. nummer 34, 35 og 42. I tabel 1.5.2 er givet en oversigt over sammenhængen mellem polygonnumrene og KV's nummerering af observationsboringer.

KNUDEPUNKT (KILDEPLADS)	KV-NUMMER PÅ TILSVARENDE OBSERVATIONSBORING	KNUDEPUNKT (KILDEPLADS)	KV-NUMMER PÅ TILSVARENDE OBSERVATIONSBORING
1	773	37	1350
2	771	38	1318
3	1221	39	769
4	1339	40	1357
5	1332	41	1342
6	1220	42	-
7	1335	43 (Vetterslev)	(1211)
8	-	44	1358
9	-	45	-
10 (Ørslev)	(1208, 1181)	46	1345
11	772	47	-
12	1336	48	1354
13	1213	49	-
14	1222	50	1352
15	1212	51	1351
16 (Ørslev)	(1209, 1208)	52	767
17	1337	53	1136
18	757	54	779
19	1224	55	490
20	1179	56	-
21	1223	57	489
22 (Aversi)	(1187)	58	797
23 (Aversi)	(770)	59	-
24	1183	60	766
25 (Tybjerglille)	(1227)	61	937
26	1334	62	796
27 (Hjælmsølille)	(1225)	63	1121
28	-	64	1195
29	1228	65	M424
30 (Mulstrup	-	66	758
31	1343	67	1198
32 (Vetterslev)	1210	68	1128
33 (Hjælmsølille)	-	69 (Mulstrup)	(760)
34	-	70	-
35	-	71	1201
36 (Tybjerglille	(1227)	72	1146
		73	1130

Numre i parentes angiver nærliggende observationsboringer, brugbare ved sammenligning mellem observerede og simulerede trykniveauer.

Tabel 1.5.2 Nummerering af grundvandsmodellens knudepunkter.

Polygonernes indbyrdes størrelsesforhold afspejler, med hvilken nøjagtighed trykniveauobservationerne i de forskellige delområder kan forventes beskrevet. Hovedvægten er lagt på området omkring Susåens løb ved de potentielle kildepladser, og det bemærkes, at Susåen og dennes tilløb næsten overalt forløber centralt gennem en række polygoner. Dette er gjort med det formål at gøre en eventuel vandudveksling med vandløbene erkendelig i vandbalancen for netop de pågældende polygoner.

1.5.5. Modelkalibrering

Ved kalibrering af modellen forstås en tilpasning af de indgående parametre og uafhængige variable, således at modellen bliver i stand til på tilfredsstillende vis at simulere et kendt forløb af den afhængige variable, her trykniveauet.

Parametrene er her de hydrauliske egenskaber T og S. Disse kendes i store træk fra udførte prøvepumpninger i området [3, 4]. Da nettet flere steder i området er mere detaljeret end forhåndskendskabet til den arealmæssige fordeling af T- og S-værdier, er der på disse steder indskudt T- og S-værdier ved interpolation. Dette kræver i sig selv en justering af de benyttede hydrauliske parametre.

Den variable størrelse Q er delvis kendt som oppumpning fra området, men indeholder også en eventuel vandtransport over randene samt vandudveksling med andre grundvandsmagasiner samt overfladevandsmagasiner i området.

Kalibreringen foregår ved, at modellen bringes til at simulere den kendte trykniveauvariation med den valgte fordeling af T, S og Q, idet Q-værdierne justeres bedst muligt ind. Det vil her næsten altid være nødvendigt at justere på T- og S-værdierne, som atter giver anledning til en yderligere justering af Q. Denne proces fortsættes, indtil et tilfredsstillende resultat er opnået.

Da der foreligger store datamængder om trykniveauvariationer i området, både arealmæssigt og tidsligt, har det kunnet lade sig gøre at foretage kalibreringen i flere stadier. Den endelige fordeling af de hydrauliske parametre samt den fundne fordeling af Q er vist på bilag 7 og 8. Kalibreringen har omfattet følgende faser:

1) Kalibrering på de maximale sænkninger opnået ved KV's 4-døgns prøvepumpning i maj 1974.
2) Kalibrering på trykniveaubilledet i august 1974.
3) Kalibrering på en 26-års tidsserie af grundvandets trykniveauer.
4) En samlet test på fase 1-3 i form af simulering af trykniveauvariationer i tiden omkring udførelsen af 4-døgns prøvepumpningen i maj 1974.

Heraf kan fase 1 og 3 siges at være en tilpasning af modellens dynamiske egenskaber, mens fase 2 kun beskæftiger sig med modellens statiske karakteristika. Denne opdeling gør det muligt at kalibrere T-værdierne (statisk parameter) til en vis grad uafhængigt af S-værdierne (dynamisk parameter). Dette ville ikke være muligt, hvis man alene var henvist til at kalibrere modellen på afsænkninger ved en prøvepumpning.

Det bør her understreges, at modeltilpasningen ikke overalt i området kan blive lige god. Prøvepumpninger giver selvsagt kun oplysninger inden for sænkningstragtens udbredelsesområde, og de mest pålidelige oplysninger fås, hvor sænkningerne er størst. Som det senere skal ses, supplerer fase 2 dog fase 1 udmærket, da førstnævnte netop giver vigtige informationer om de hydrauliske forhold langs områdets begrænsning. Kalibreringen på området nord for Ringsted bygger hovedsageligt på fase 2, idet det ikke er skønnet nødvendigt at finjustere modellen, da nye sænkninger i modellens sydlige del kun i ringe grad vil brede sig nordpå. Imidlertid har området omkring Regnemark betydning på grund af den konstaterede lækage.

1.5.5.1. Fase 1: 4-døgns prøvepumpning

De observerede afsænkninger efter 4-døgns prøvepumpningen er angivet på bilag 3, hvortil blot skal bemærkes, at angivelse af sænkninger på under 50 cm visse steder er behæftet med betydelig usikkerhed hidrørende fra tilsyneladende tilfældige trykniveauvariationer. Årsagen til disse kan være barometereffekt eller lokale periodevise pumpninger og til en vis grad måleusikkerhed, hvor manometre har været anvendt.

POLYGON-NUMMER	SÆNKNINGER (cm)		POLYGON-NUMMER	SÆNKNINGER (cm)	
	Observeret	Simuleret		Observeret	Simuleret
1	10?	7	41	40	39
2	10	6	42	(125)	125
3	9?	5	43	(190)	187
4	~0	1	44	75	77
5	~0	2	45	(75)	71
6	7	9	46	37	37
7	12	13	47	(20)	11
8	(10)	15	48	~0	4
9	(75)	100	49	(0)	1
10	204	206	50	0	2
11	71	71	51	~0	10
12	84	83	52	25	27
13	20	20	53	0	0
14	144	145	54	0	1
15	200	185	55	0	0
16	(200)	198	56	(5)	2
17	15	15	57	0	0
18	8	9	58	75?	71
19	24	23	59	(0)	1
20	111	154	60	(20)	8
21	150	151	61	66?	67
22	179	180	62	190?	128
23	180	187	63	(0)	3
24	119	118	64	12	11
25	(120)	123	65	34	69
26	119	123	66	13	13
27	(150)	157	67	5	3
28	(170)	164	68	(0)	0
29	177	159	69	(60)	197
30	(130)	163	70	(120)	124
31	201	152	71	(0)	0
32	170	173	72	(0)	0
33	(150)	180	73	(5)	1
34	(125)	125			
35	(120)	120			
36	110	105			
37	48	50			
38	68	70			
39	115	105			
40	20?	20			

Tal i parentes angiver, at interpolation er foretaget ud fra bilag 3.

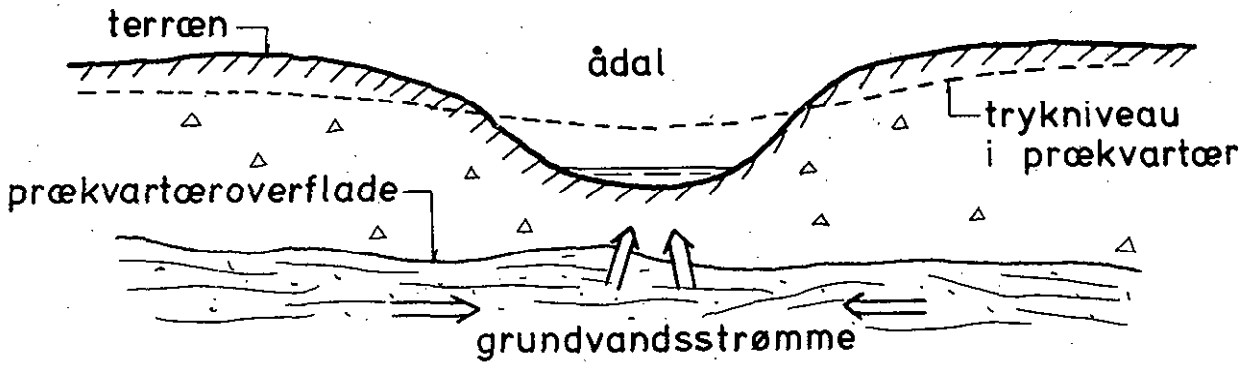
Tabel 1.5.3 Kalibreringsresultater, fase 1.
KV's 4-døgns prøvepumpning i maj 1974.

Modellen bringes til at simulere sænkningsforløbet ud fra en tilstand, hvor trykniveauet antages at være konstant i hele modelområdet. Sænkningerne som følge af prøvepumpningen kan nemlig, da systemet er lineært og superpositionsloven derfor gyldig, betragtes som uafhængige af de øvrige trykniveauvariationer i området. Ved brug af trial-and-error princippet findes en fordeling af T, S og Q, som muliggør simulering af de maximale sænkninger, der i tabel 1.5.3 er sammenstillet med de tilsvarende observationsresultater. Den her fundne fordeling af de hydrauliske parametre afviger ikke væsentligt fra det endelige kalibreringsresultat, som er præsenteret på bilag 7. I kolonnen med pejleresultater er tallene i parentes fremkommet som interpolation mellem egentlige observationer i henhold til det konstruerede sænkningskort på bilag 3.

Stort set er overensstemmelsen mellem den observerede og den simulerede afsænkning tilfredsstillende og ligeligt fordelt på positive som negative afvigelser. Enkelte steder findes afvigelser på op til en halv meter; men f.eks. i polygon 62 og 31 kan vandindvindingen fra Ringsted-området meget vel tænkes at gribe forstyrrende ind i prøvepumpningsresultaterne. Ved fastlæggelsen af de hydrauliske parametre er det tilstræbt at undgå bratte spring i størrelsen af S- og T-værdierne, hvor sådanne ikke er sandsynliggjort af grænsers tilstedeværelse.

1.5.5.2. Fase 2: Trykniveauer august 1974

På bilag 2 er angivet den i KV's boringer registrerede vandrejsning i august 1974, idet en del af målingerne er frasorteret, da de er skønnet fejlbehæftede af ovenfor nævnte årsager. Det gælder bl.a. boringerne langs Susåen ved Hjælmsølille, hvor vandrejsningen ligger en del over terræn, og nogle af boringerne giver bagvand. Trykniveauet i det paleocæne reservoir ses at være tydeligt påvirket af vandløbenes tilstedeværelse, idet trykniveauet omkring åerne flere steder er lavere end i de tilstødende områder. Dog har Susåen eroderet sig så langt ned i de kvartære aflejringer, at trykniveauet i ådalen nedstrøms for Aversi er betydeligt over terrænkoten. Figur 1.5.3 viser et skematisk snit i de geologiske formationer vinkelret på Susåen nedstrøms for Aversi.



Figur 1.5.3 Skematisk snit i Suså-dalen.

Som antydet på figuren synes trykniveauforholdene at tyde på optrængning af grundvand i åerne. Andre undersøgelser omtalt i [4] peger i samme retning. Problemstillingen vedrørende vandudvekslingen mellem prækvartæret og vandløbene er uddybet i afsnit 3.2. Grundlaget for en bestemmelse af denne vandudveksling har hovedsageligt været synkronmålinger af vandføringen foretaget af Hedeselskabet i august-september 1975, en tørkeperiode, hvor Susåens vandføring næsten udelukkende bestod af grundvandstilskud og spildevand. Vandføringsmålingerne er foretaget med så lille afstand mellem målestederne, at det er muligt med rimelig nøjagtighed at henføre grundvandstilskuddet til hver enkelt polygon, åen gennemløber. Denne fordeling er vist i tabel 1.5.4, hvor det bemærkes, at der i polygon 24 og 25 regnes med en nedsivning fra å til grundvandsmagasin, idet vandføringen på måletidspunktet var aftagende i nedstrøms retning og det prækvartære trykniveau iøvrigt beliggende under åens vandspejl.

POLYGON-NR.	20	21	22	23	24	25	27	32	33	43	44	50	51
GRUNDVANDS-TILSKUD (l/s)	10	10	5	5	÷15	÷10	30	20	20	5	80	25	25

På bilag 7 er de i tabellen nævnte polygoner markeret.

Tabel 1.5.4 Fordeling af grundvandstilskud til åløbene.

Foruden denne vandudveksling med omgivelserne vides det, at der på lokalt plan foretages vandindvinding til industri, landbrug og privat forbrug. Denne foregår for størstedelens vedkommende fra det paleocæne magasin, og de for 1973-74 angivne oppumpede vandmængder [7] er i det følgende forudsat indvundet fra denne formation.

Centreret omkring polygonerne 63 og 68 ligger KV's kildepladser, der siden deres etablering generelt har afstedkommet sænkninger på 4-5 meter. Som omtalt i afsnit 1.5.1.3 har dette medført en forøget grundvandsdannelse i området; men det kan være svært nøjagtigt at fastslå lækagebidraget, da pumpekapaciteten har været jævnt stigende i de år, indvindingen har stået på. Imidlertid synes de sidste års pejleresultater at berettige en formodning om, at situationen stort set er stationær i området omkring kildepladserne. Ud fra denne antagelse kan lækagen bringes til at balancere oppumpningen ved i modellen at anvende lækagekoefficienter, hvis størrelse er angivet i tabel 1.5.5 for hver af de implicerede polygoner. De her benyttede koefficienter afviger lidt fra de i afsnit 1.5.2 fundne; men da her er tale om gennemsnit over større arealer og flere kildepladser, er overensstemmelsen tilfredsstillende til formålet.

POLYGON-NUMMER	55	57	58	60	61	63	64	67	68	71	72	73
$P'/m' \times 10^9 (s^{-1})$	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	0,7	1,0	1,0	1,5	1;0	1,0	2,0

Tabel 1.5.5 Lækagekoefficienter for polygoner i Regnemark-området.

Ved at medtage vandudvekslingen med åerne, den lokale vandindvinding og lækagen ved Regnemark i modellens opstilling af vandbalancen er det muligt at vurdere, om de nævnte bidrag er tilstrækkelige til at opretholde det eksisterende trykniveau. Dette viser sig ikke at være tilfældet. Opstilles en vandbalance for hele modellen under ét, findes under disse betingelser et underskud på ca. 350 l/s, og en simulering viser, at grundvandets trykniveau i så fald generelt skulle falde adskillige meter pr. år.

Betragtes den nuværende tilstand i grundvandsforholdene som værende stationær (der ses i denne forbindelse bort fra årstidsfluktuationer), hvilket sandsynliggøres af pejleresultaterne, må der enten ske en yderligere nedsivning af nedbør til magasinet eller en netto-grundvandsstrøm ind gennem modelområdets rand. I virkeligheden er den eneste del af modellens impermeable begrænsning, der med sikkerhed kan siges at være påvist ved prøvepumpning, den sydlige grænse mellem Torpe og Bregentved-søerne. De eksisterende trykniveauer på bilag 2 samt årstidsfluktuationerne omtalt i afsnit 1.5.3.6 tyder da også på, at grundvandsstrømme fra kalken

nordøst for polygon 1 krydser modelbegrænsningen. Tilsvarende kan det relativt høje trykniveau i det nordvestlige hjørne af modellen forklares ved en indstrømning over modelområdets afgrænsning på dette sted. Det markante fald i trykniveauet mod sydvest må ved samme betragtningsmåde medføre en udstrømning fra området, der dog på grund af en lille transmissivitet må være ret ringe. De steder, hvor der kan forventes bidrag fra underjordisk til- og afstrømning, er markeret med pile på bilag 8.

Trykniveauforholdene og betragtningerne i afsnit 1.5.3.6 og 1.5.1.3 berettiger endvidere antagelsen af en lækage omkring Haslev, og på bilag 8 er de områder i modellen, der må formodes at bidrage til grundvandsdannelsen, markeret. De forskellige bidrag til vandudvekslingen med modellens grundvandsreservoir, der kan kalibreres, er herefter:

1) Lækagen i Regnemark-området,
2) Lækagen omkring Haslev by,
3) Grundvandsstrømmene over modelområdets rand nord og øst for Haslev,
4) Den sydgående grundvandsstrøm ved randen syd for Glumsø,
5) Grundvandsstrømmen over modellens nordvestlige rand,

hvoraf 1) er bestemt som angivet ved tabel 1.5.5.

Ved kalibrering af modellen på trykniveauerne august 1974 er den nuværende grundvandsdannelse omkring Haslev by fundet at andrage de værdier, der fremgår af tabel 1.5.6.

POLYGON-NUMMER	4	5	6	11	12	13
NEDSIVNING (mm/år)	20	30	60	50	60	60

Tabel 1.5.6 Lækage ved Haslev.

Den fundne størrelse af de forskellige grundvandsstrømme ind i og ud af modelområdet er anført på bilag 8. Der er yderligere foretaget en nedtrapning af T-værdierne i området ved Glumsø, da det ret bratte fald i trykniveauerne ellers ikke kan forklares.

Efter denne finjustering af modellen fås en simulering af trykniveaubilledet som angivet på bilag 9. Afvigelserne mellem de observerede og de simulerede trykniveauer beløber sig maximalt til

ca. 2 meter. Denne afvigelse vil ved en yderligere finjustering kunne nedbringes, men da de simulerede og observerede trykniveauer ses at have praktisk taget samme relative forløb, er det fundet unødvendigt yderligere at justere modellen. Afvigelserne kan til en vis grad forklares ved, at der i polygoner indeholdende flere observationsboringer kan observeres trykniveauforskelle inden for hver polygon på op til 1-2 meter, hvor der i modellen regnes med ét repræsentativt trykniveau pr. polygon.

Det fremgår af det foregående, at mange væsentlige informationer om grundvandsforholdene kan tilvejebringes ved en statisk kalibrering af modellen. Da trykniveaubilledet antages stationært, ses magasintallene ikke at indgå i beregningerne, og der opnås et af prøvepumpningsresultater uafhængigt test på de anvendte T-værdier.

1.5.5.3. Fase 3: Årstidsfluktuationer

I denne fase af kalibreringen søges modellen tilpasset til at kunne simulere årstidsfluktuationerne og deres arealmæssige fordeling, jvf. afsnit 1.5.3.6, idet det søges undersøgt, om årstidsfluktuationerne alene hidrører fra varierende nedsivning i de udpegede områder ved Haslev og Juellund samt eventuelt Regnemark. Endvidere fås endnu et uafhængigt test på de anvendte S- og T-værdier.

Da grundvandsstrømmene ind i modelområdet hidrører fra nedsivende nedbør, og denne nedsivning vides at være sæsonbestemt, må også grundvandsstrømmene fluktuere. Dette viser sig som gradientfluktuationer hen over områdets ydre begrænsning, og trykniveauobservationerne muliggør derfor et overslag over disse variationers amplitude (idet T-værdierne er kendte fra fase 1 og 2). Grundvandsstrømmene over randen nord og øst for Haslev synes typisk at variere ca. 5% over året, mens tilsvarende overslag tyder på variationer i nedsivningsbidragene ved Haslev på ca. 25% over året. Sæsonvariationerne i grundvandsdannelsen lader sig simulere ud fra nedbørsdata med den i kapitel 2 beskrevne nedbør-afstrømningsmodel (NAM). Fremgangsmåden er beskrevet i detaljer i afsnit 3.3. Her skal blot præsenteres resultatet af at lade de under fase 2 fundne nedsivningsbidrag og grundvandsstrømme fluktuere i takt med NAM's grundvandsdannelse.

Fig. 1.5.4. - 5. viser den observerede og simulerede tidsserie af grundvandsfluktuationerne for nogle udvalgte boringer i perioden 1950-75. Overensstemmelsen kan ved første øjekast synes dårligere op til omkring 1970 end i de efterfølgende år. Årsagen er imidlertid, at der ved simuleringen for simpelheds skyld er gået ud fra, at Regnemarkværket har kørt med konstant kapacitet (svarende til kapaciteten 1973-74) gennem alle årene. Det fremgår imidlertid helt tydeligt f.eks. af forløbet i knudepunkt 2, at de to kurver forløber stort set parallelt i tiden fra 1950 til ca. 1964, hvorefter kurverne nærmer sig hinanden og forløber tæt op ad hinanden efter ca. 1969-70. Regnemarkværkets kapacitet er netop i det nævnte tidsrum forøget lineært fra nul i 1963 til ca. 12 mill. m^3/år i 1970 (jvf. figur 6.2.4), og sænkningerne har som vist på bilag 5 bredt sig sydpå fra kildepladserne, hvilket har den nævnte effekt på trykniveauforløbet.

Den stedlige variation af årstidsfluktuationerne synes rimeligt godt beskrevet i simuleringen for de boringer, der befinder sig omkring Haslev og nord herfor op til polygon 18; længere vestpå simuleres for små sæsonvariationer. I den nordlige del af området er billedet meget forstyrret af varierende oppumpning og den betydelige lækage, så beskrivelsen her kun kan blive summarisk. Konklusionen må blive, at det kan anses for bekræftet, at der foregår en lækage ved Haslev og en grundvandsstrøm fra nordøst ind i modelområdet. Endvidere foregår der gennem området en grundvandsstrøm fra nordvest mod syd, hvor en stor del af vandet dog siver ud i vandløbene undervejs. Størrelsen af de omtalte grundvandsstrømme er estimeret i grundvandsmodellen, og deres sæsonvariation er rimeligt godt beskrevet ved hjælp af NAM. Der synes dog også at være tale om en dog betydeligt mindre lækage andre steder i oplandet, ellers kan de observerede fluktuationer i den vestlige del ikke forklares. Der er i det følgende set bort fra en eventuel mindre lækage andre steder end de først beskrevne, bl.a. fordi prøvepumpningsresultaterne fra kildepladserne langs Susåen ikke udviser lækagetendenser, og trykniveaubilledet ikke synes at indicere tilstedeværelse af væsentlig lækage andre steder end i de på bilag 8 markerede polygoner.

En bedre beskrivelse af årstidsfluktuationerne ud over oplandet kunne være ønskelig; men det er ikke fundet formålstjenligt i den-

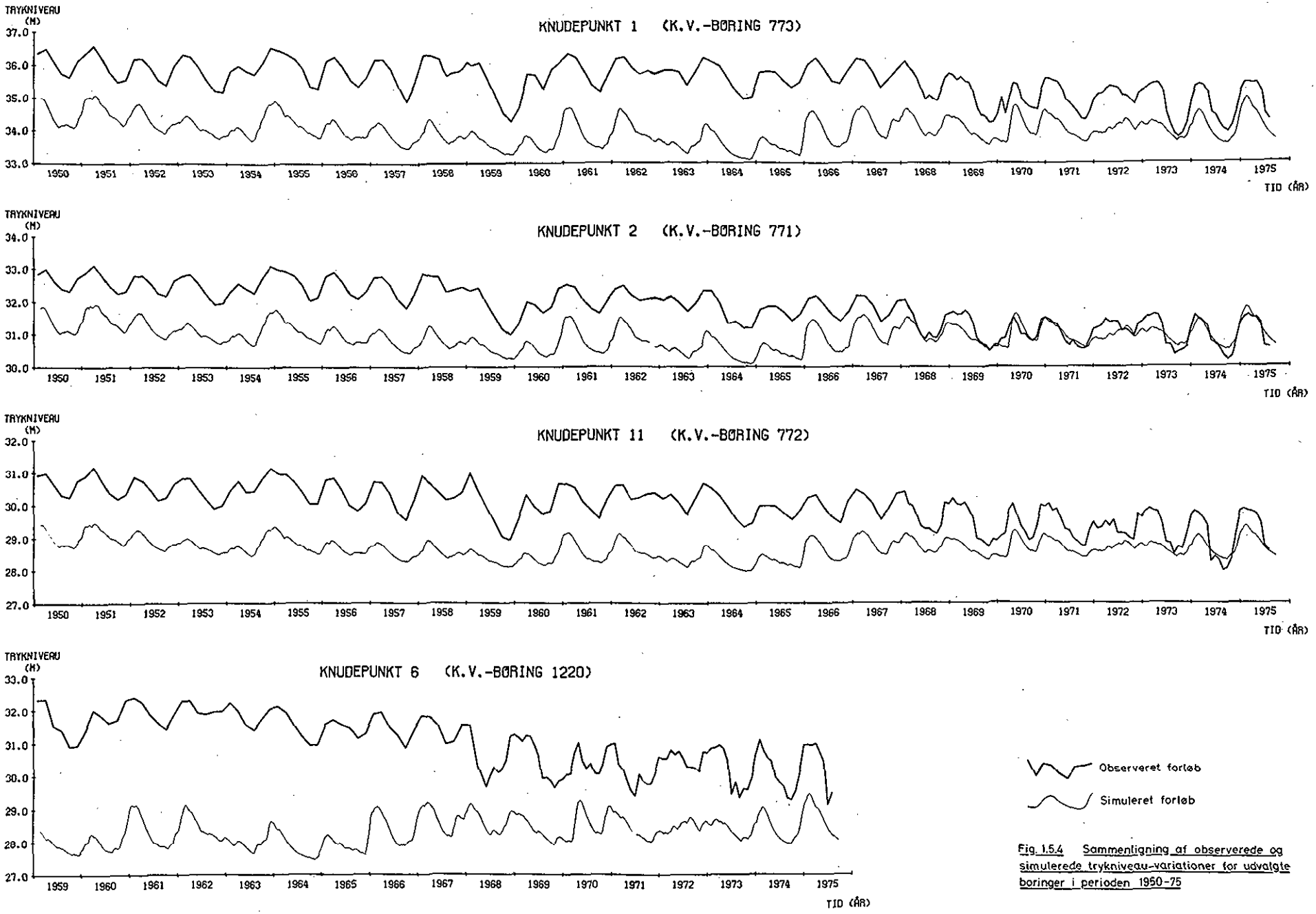


Fig. 1.5.4 Sammenligning af observerede og simulerede trykniveau-variationer for udvalgte boringer i perioden 1950-75

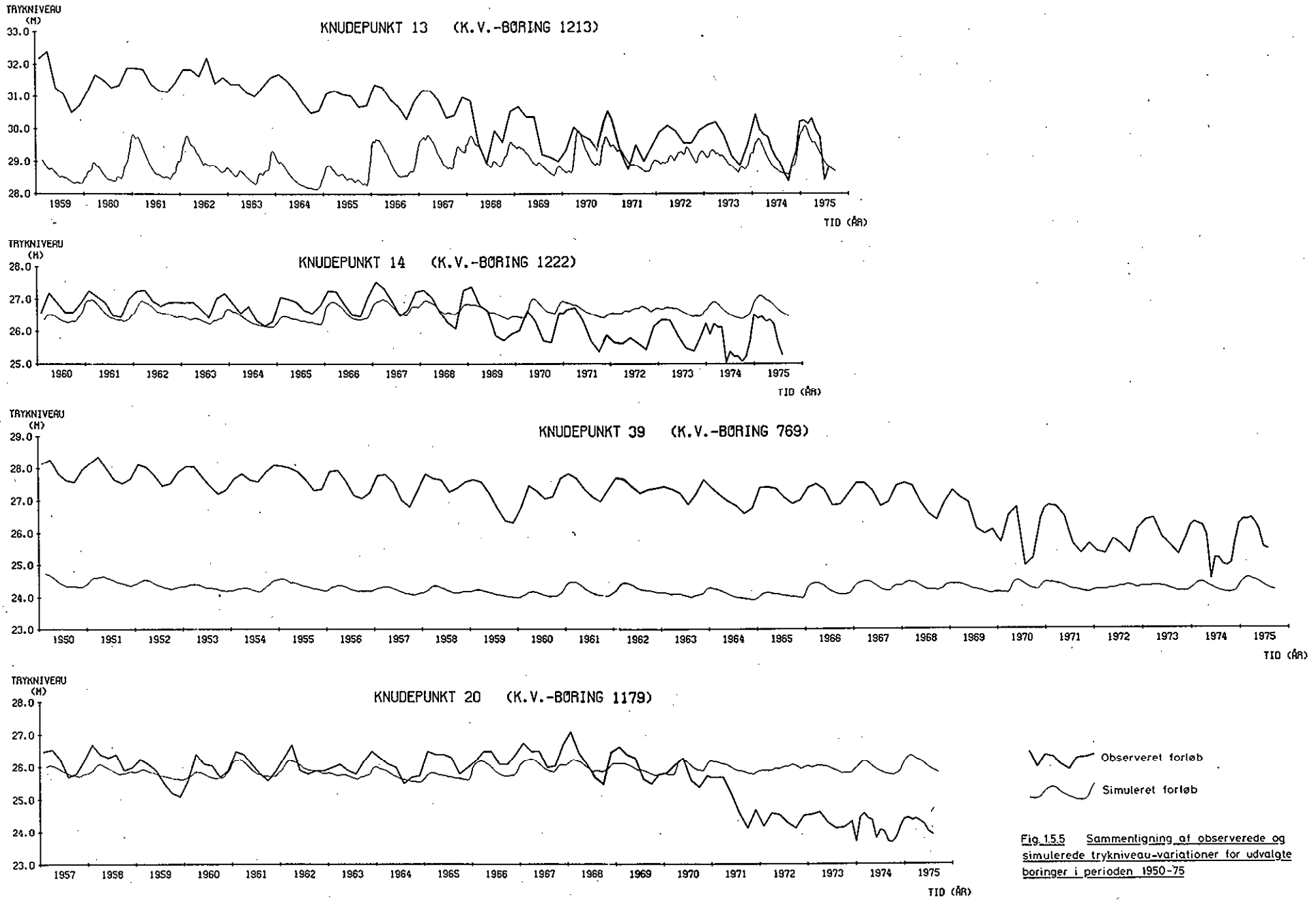


Fig. 1.5.5 Sammenligning af observerede og simulerede trykniveau-variationer for udvalgte boringer i perioden 1950-75

ne sammenhæng at forsøge en yderligere kalibrering på netop dette fænomen.

1.5.5.4. Fase 4: Trykniveauvariationer maj-juni 1974

Til slut bringes alle de i fase 1-3 beskrevne hydrologiske mekanismer ind i modellen, idet systemets egentlige målbare respons, trykniveauvariationerne ved 4-døgns prøvepumpningen søges simuleret. Denne form for kalibrering siger en hel del mere om modellens dynamiske virkemåde end blot en kalibrering på de maximale afsænkninger, da tidsforløbet af såvel sænknings- som retableringsperioden inddrages.

Fig. 1.5.6. viser de observerede og simulerede trykniveauforløb i tidsrummet maj-juni 1974 for en stor del af boringernes vedkommende. Eftersom simuleringen er foretaget med 4-timers tidsskridt, er det simulerede forløb tegnet som kontinuert kurve, mens de enkelte målinger er markeret for det observerede trykniveauforløb. For langt de fleste boringers vedkommende er de to kurvers forløb kongruente, og årsagerne til den afvigelse, der viser sig i form af en parallelforskydning på op til et par meter, er omtalt under afsnit 1.5.5.2. Det ses, at modellen i mange tilfælde er i stand til at simulere både sænkningsforløb og retablering med en nøjagtighed, der svarer til måleusikkerheden. Denne er bl.a. bestemt ved barometereffekten, der her udgør maximalt 10 cm. Observationerne er desværre behæftet med den skavank, at starten af retableringskurven kun er belyst i polygon 22 og 23, hvor boringerne er pejlet den 1/6. Disse to observationer er i overensstemmelse med de simulerede retableringskurver for boringer i nærheden af pumpelokaliteterne.

I den sydøstlige del af modelområdet repræsenteret ved polygon 2, 4 og 6 er retableringsforløbet beskrevet mærkbart dårligere end i resten af området. Dette kan skyldes, at det er den sæsonbestemte nedsivning omkring Haslev, der her påvirker grundvandsstanden mest. Til trods for at sæsonvariationerne over en årrække er udmærket beskrevet i netop dette område (jvf. afsnit 1.5.5.3), er beskrivelsen af fluktuationer inden for mindre tidsrum åbenbart mangelfuld.

Observationerne omkring Ringsted i polygon 58, 61 og 62 er tilsyneladende forstyrret af en lokal, varierende oppumpning, idet for-

styrrelserne er i fase i de tre boringer 796, 797 og 937. Som tidligere nævnt er her sandsynligvis tale om forstyrrelser fra vandindvindingen ved Ringsted. De lokale fluktuationer i depressionen omkring Glumsø er det heller ikke muligt at beskrive helt tilfredsstillende på grund af de lokalt meget inhomogene geologiske forhold.

1.6. Vurdering af modellen

1. Generelt set må den anvendte programalgoritme siges at have vide anvendelsesmuligheder på grund af sin relativt simple opbygning og relation til de fysiske forhold, der betinger vandudveksling med andre reservoirer. Modellen er anvendelig på såvel frie som artesiske reservoirer og overgangstilfælde herimellem.
2. En ulempe ved anvendelse af modellen kan siges at ligge i konstruktion af polygonnettet. Udførelsen kan være ret tidskrævende, og metoden er derfor mest velegnet i tilfælde, hvor ét bestemt område skal underkastes en indgående undersøgelse. Andre metoder som f.eks. endelig-differens grundvandsmodeller er hurtigere at opstille og derfor bekvemme at anvende, især når et område ikke skal undersøges så grundigt, som tilfældet er her [19].
3. Den anvendte iterative løsningsmetode er i princippet altid konvergent og giver således mulighed for et frit valg af iterationstolerance og tidsskridt. Dog står man sig ved ikke at vælge sin tolerance for lille i forhold til den samlede vandudveksling med omgivelserne. Vælges en tolerance på 5-10% af den foretagne ændring i oppumpningen, fås trykniveauerne beregnet med centimeters nøjagtighed, altså svarende til den nøjagtighed, hvormed der kan observeres. Beregningstiden på datamaten er størst, når der foretages store indgreb i de naturlige forhold, og når der vælges store tidsskridt. Antallet af polygoner i modellen er naturligvis også en afgørende faktor, da ligningssystemets størrelse bestemmes ved polygonantallet.
   Som eksempel kan nævnes, at den endelige simulering i kalibreringsfase 4, der er foretaget med 4-timers tidsskridt og en tolerance på ca. 1.5% af prøvepumpningskapaciteten, har forbrugt 9.9 sekunder i regnetid på NEUCC's IBM 370/165 datamat.

4. Med hensyn til den aktuelle model i Susåens opland må de nuværende grundvandsforhold anses for tilstrækkeligt godt beskrevet. De fundne værdier af modelparametrene i de enkelte polygoner skal nok tages med visse forbehold, idet en helt entydig fordeling næppe er mulig. Men modellen er i stand til at give oplysninger om lækage og grundvandsstrømme over modelområdets rand i store træk, hvilket for nærværende er tilstrækkeligt. Simuleringen af de fremtidige grundvandsforhold under forudsætning af forskellige indgreb bygger nemlig på en ekstrapolation ud fra de nuværende hydrologiske forhold.

2. MATEMATISK MODEL FOR VANDLØBSAFSTRØMNINGEN

2.1. Indledning

Der er opbygget en generelt anvendelig og på fysiske principper baseret matematisk model, som - med forskellige parameterværdier - er i stand til at simulere vandløbsafstrømningen i forskellige typer vandløb.

Den opstillede model - i det følgende benævnt som nedbør-afstrømnings-modellen (NAM) - er en matematisk model, som simulerer nedbør-afstrømningsforløbet inden for et vandløbssystems opland. Som inputdata kræves meteorologiske tidsserier af nedbør, temperatur og potentiel fordampning. På grundlag heraf simulerer NAM som hovedresultat de tidslige variationer i vandløbsafstrømningen, men den giver samtidig information om andre komponenter i den del af det hydrologiske kredsløb, der foregår på landjorden, f.eks. nedsivningen til grundvandet, den aktuelle fordampning og jordens fugtighedsindhold.

Efter at formålet med modellen er nævnt, beskrives og diskuteres modelopbygningsarbejdet, selve modellen, dens datakrav samt modelparametrene. På grundlag heraf foretages en kalibrering af NAM på Suså-området. Endelig gives en vurdering af modellens generelle anvendelighed og specielt dens egnethed til at løse den stillede opgave.

Som en generel introduktion til emnet hydrologisk simulering, herunder specielt i relation til vandløbsafstrømning, kan i øvrigt anbefales en nylig udkommet bog [15].

2.2. Målsætning

Der er inden for de sidste 10 år blevet udviklet adskillige matematiske modeller med vidt forskellige formål. Hovedformålene kan groft taget inddeles i følgende kategorier:

1. Forskning. At få belyst enkelte delprocesser og/eller deres sammenhæng i det hydrologiske kredsløb.
2. At forudsige konsekvenserne af klimamæssige ændringer eller forskellige menneskelige indgreb i det hydrologiske kredsløb.

3. At supplere korte eksisterende vandføringsdataserier med længere simulerede serier i dimensioneringsøjemed.
4. At opstille prognoser, f.eks. i forbindelse med oversvømmelsesvarsling og styring af et reservoirsystem, så vandmængden kan udnyttes optimalt.

Valget af modeltype og -kompleksitet vil først og fremmest afhænge af målsætningen for det aktuelle modelarbejde, men naturligvis også af såvel kvaliteten som kvantiteten af det tilgængelige datamateriale. Hvis hovedformålet er forskning, kan modellen blive meget kompleks, hvilket øger besværlighederne ved dataindsamling og kalibrering. Hvis målsætningen derimod er en beskrivelse af den virkelige afstrømning svarende til de ved punkt 3 og 4 omtalte anvendelser, er det ønskeligt med en så simpel model som muligt. Kravet om fysisk rigtighed prioriteres da ikke så højt, hvorimod modellen bør være dynamisk korrekt, så at den har en korrekt respons på input til systemet.

Målene for vandløbsafstrømningsmodelarbejdet i dette projekt er ifølge undersøgelsesprogrammet

a) at give informationer vedrørende tidslige variationer i nedsivningen til eller udsivningen fra grundvandsmagasinet,
b) at give kvantitative udsagn om de ændringer i vandløbsafstrømningen, som øget grundvandsindvinding inden for det betragtede område vil medføre,
c) at undersøge de hydrologiske konsekvenser for vandløb og søer af overfladevandsindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø, eventuelt i forbindelse med anlæggelse af kunstige søer på passende steder langs Susåen for at øge reguleringsmagasinets volumen,
d) sammen med grundvandsmodellen at undersøge mulighederne for en koordineret grundvands- og overfladevandsindvinding.

Da der kun eksisterede et meget ufuldstændigt stationsnet for vandføringsmålinger opstrøms for Tystrup-Bavelse Sø før efteråret 1973, skal nedbør-afstrømnings-modellen i forbindelse med c) og d) bl.a. benyttes til at simulere længere vandføringstidsserier.

Sigtet med den nedbør-afstrømnings-model, som skal udvikles og anvendes i dette projekt, ses således at omfatte en stor del af

ovennævnte kategorier 1 - 4. Herudfra besluttedes det at opbygge en så fysisk velbegrundet model som muligt med de begrænsninger, som et ufuldstændigt datamateriale og en mangelfuld viden om nogle af det hydrologiske kredsløbs delprocesser sætter. Modellen er således ikke nogen endelig og på alle måder fysisk velbegrundet model, men kun et skridt henimod dette mål.

2.3. Nedbør-afstrømnings-modellen

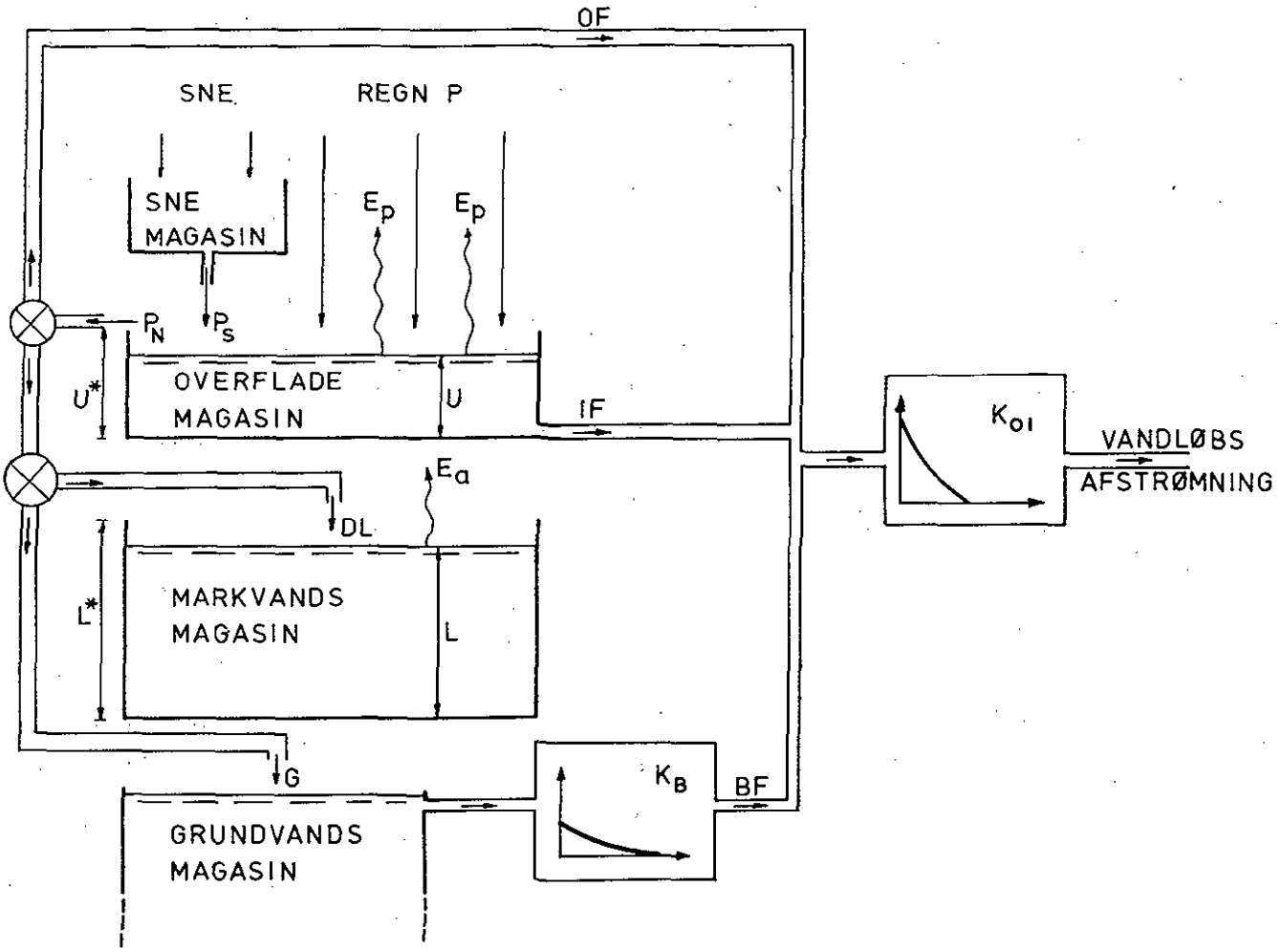
2.3.1. Modelopbygningsarbejdet

Ved modelarbejdet er der taget udgangspunkt i en eksisterende dansk nedbør-afstrømnings-model [8].

Fremgangsmåden har herefter været følgende:

1. Denne model er blevet anvendt på 6 afstrømningsområder med i alt 69 års data uden for Susåens opland. Ved disse simuleringer er det blevet bemærket, under hvilke forhold modellen ikke har været i stand til at beskrive det observerede afstrømningsforløb.
2. På baggrund af de således opnåede erfaringer med NAM og på baggrund af erfaringer fra anvendelse af andre modeller på det samme datamateriale, jvf. [9], er forskellige forandringer i NAM blevet efterprøvet. Ved vurderingen af hvilke forandringer, der skulle foretages, er der anvendt det princip, at ekstra parametre, som gjorde modellen mere kompleks, eller andre rutiner i stedet for de oprindelige ikke er anvendt, med mindre de forbedrede simuleringen og gav en bedre fysisk beskrivelse af virkeligheden.
3. Parametrenes stabilitet med tiden og den nødvendige længde af kalibreringsperioden er vurderet.
   Forskellen i parameterværdierne mellem de 6 afstrømningsområder er vurderet ud fra kendskab til områdernes hydrologiske karakteristika. I det omfang, variationen i parameterværdierne ikke har kunnet forklares herudfra, er der foretaget ekstra undersøgelser af de benyttede data, og ændringer i modellen er gennemprøvet.
4. Ved kalibreringen af modellen til et afstrømningsområde er anvendt en automatisk kalibreringsrutine, som er udviklet i et samarbejde med Numerisk Institut, DtH [10].

Rutinen er i stand til ud fra et numerisk kriterium at optimere 6 parametre på grundlag af indtil 8 års data. Som numerisk kriterium benyttes en minimering af summen af kvadratafvigelserne mellem den simulerede og den observerede daglige vandføring. Andre numeriske kriterier har været forsøgt, men uden bedre resultater.



Figur 2.3.1 NAM's opbygning.

2.3.2. Den endelige model, NAM

Strukturen og de benyttede relationer i slutmodellen adskiller sig kun få steder fra [8], hvorfor NAM kun vil blive ret kort omtalt her.

Hovedbestanddelen i modellen er en række magasiner, som repræsenterer forskellige fysiske elementer i naturen. Vandets bevægelse i naturen bliver i modellen beskrevet som en transport af vand mellem de forskellige magasiner i overensstemmelse med empiriske og teoretiske formler. Ved kontinuert at tage hensyn til vandind-

holdet i de forskellige magasiner kan modellens funktion karakteriseres som en bogholderiteknik.

Modellens struktur fremgår af diagrammet på figur 2.3.1. Som det kan ses, er der forsøgt lavet en simpel efterligning af det hydrologiske kredsløbs landfase. Modellen opererer med fire forskellige typer magasiner, der er forbundet som vist på figuren.

Ved overfladem agasinet og markvandsmagasinet er der øvre grænser for vandindholdet, som betegnes henholdsvis U^* og L^*, mens det aktuelle vandindhold i de to magasiner angives med henholdsvis U og L. Derimod er der ikke nogen øvre grænse for vandindholdet i snemagasinet og grundvandsmagasinet.

Snemagasinet

Når den daglige middeltemperatur T er under frysepunktet, antages nedbøren at falde som sne. Den akkumuleres i snemagasinet, og når T bliver positiv, formodes det, at en daglig portion sne P_s smelter:

$$P_s = C_s \cdot T$$

Snesmeltekonstanten C_s er en modelparameter, som estimeres ud fra observerede vandføringshydrografer i tøbrudssituationer.

Overfladem agasinet

Overfladem agasinet modtager regn og smeltet sne og afgiver vand til overfladenær afstrømning, infiltration, fordampning og interflow.

Så længe der findes vand i overfladem agasinet, sker der en fordampning, der er lig den potentielle evapotranspiration E_p.

Den vandmængde IF, der forsvinder som interflow, antages at variere på følgende måde

$$IF = \begin{cases} C_{IF} \dfrac{L/L^* - C_{L1}}{1 - C_{L1}} \cdot U & \text{for } L/L^* > C_{L1} \\ 0 & \text{for } L/L^* \leq C_{L1} \end{cases}$$

Når overfladem agasinet er fyldt op, sker der en udstrømning P_N herfra. En del af denne udstrømning ender som overfladenær afstrømning

$$OF = \begin{cases} C_{OF} \dfrac{L/L^* - C_{L2}}{1 - C_{L2}} \cdot P_N & \text{for } L/L^* > C_{L2} \\ 0 & \text{for } L/L^* \leq C_{L2} \end{cases}$$

Modelparametrene C_{IF}, C_{OF}, C_{L1} og C_{L2} er alle positive dimensionsløse tal mindre end 1. OF tænkes ikke kun at beskrive den afstrømning, der foregår på jordoverfladen, men i langt højere grad den afstrømning, der finder sted i de øverste jordlag og gennem drænrørene. IF tænkes ligeledes at finde sted gennem jordlag, naturlige og kunstige dræn, men blot med nogen forsinkelse i forhold til OF, idet IF forsinkes af overfladem agasinet, før det routes videre gennem vandløbssystemet med tidskonstanten K_{OI}. Data fra en drænvandsundersøgelse [11] synes i nogen grad at bekræfte disse formodninger.

Markvandsmagasinet

Den del af P_N, der ikke strømmer af som OF, infiltrerer ned i markvandsmagasinet. En del heraf formodes at komme helt ned til grundvandsmagasinet efter relationen

$$G = \begin{cases} (P_N - O_F) \cdot (L/L^* - C_{LG}) & \text{for } L/L^* > C_{LG} \\ 0 & \text{for } L/L^* \leq C_{LG} \end{cases}$$

Modelparameteren C_{LG} er et positivt dimensionsløst tal mindre end 1. Resten af P_N magasineres i markvandsmagasinet

$$DL = (P_N - OF) - G$$

Såfremt overfladem agasinet hverken er fyldt op eller tømt, d.v.s. $0 < U < U^*$, sker der hverken overfladenær afstrømning eller infiltration. Hvis overfladem agasinet er helt tømt, sker der en direkte fordampning fra markvandsmagasinet. Denne aktuelle evapotranspiration sættes lig

$$E_a = E_p \cdot L/L^* = -DL$$

Grundvandsmagasinet

Opbygningen af vandindholdet i grundvandsmagasinet bestemmes af G. Grundvandsmagasinet beskrives ved et lineært reservoir med tidskonstanten K_B.

På grund af ikke-lineariteten i nogle af ovenstående relationer foretages fordelingen af nedbøren på OF, G og DL mm for mm.

Såfremt det er aktuelt, kan der umiddelbart tages hensyn til søområder samt områder med bymæssig bebyggelse, hvor der er såvel befæstede arealer som spildevandsudledning.

2.3.3. Datakrav

For at kunne simulere vandføringen kræver NAM

1) Daglige nedbørsobservationer.
2) Daglige minimums- og maximumstemperaturer i frostperioder.
3) Månedlige værdier for potentiel evapotranspiration.

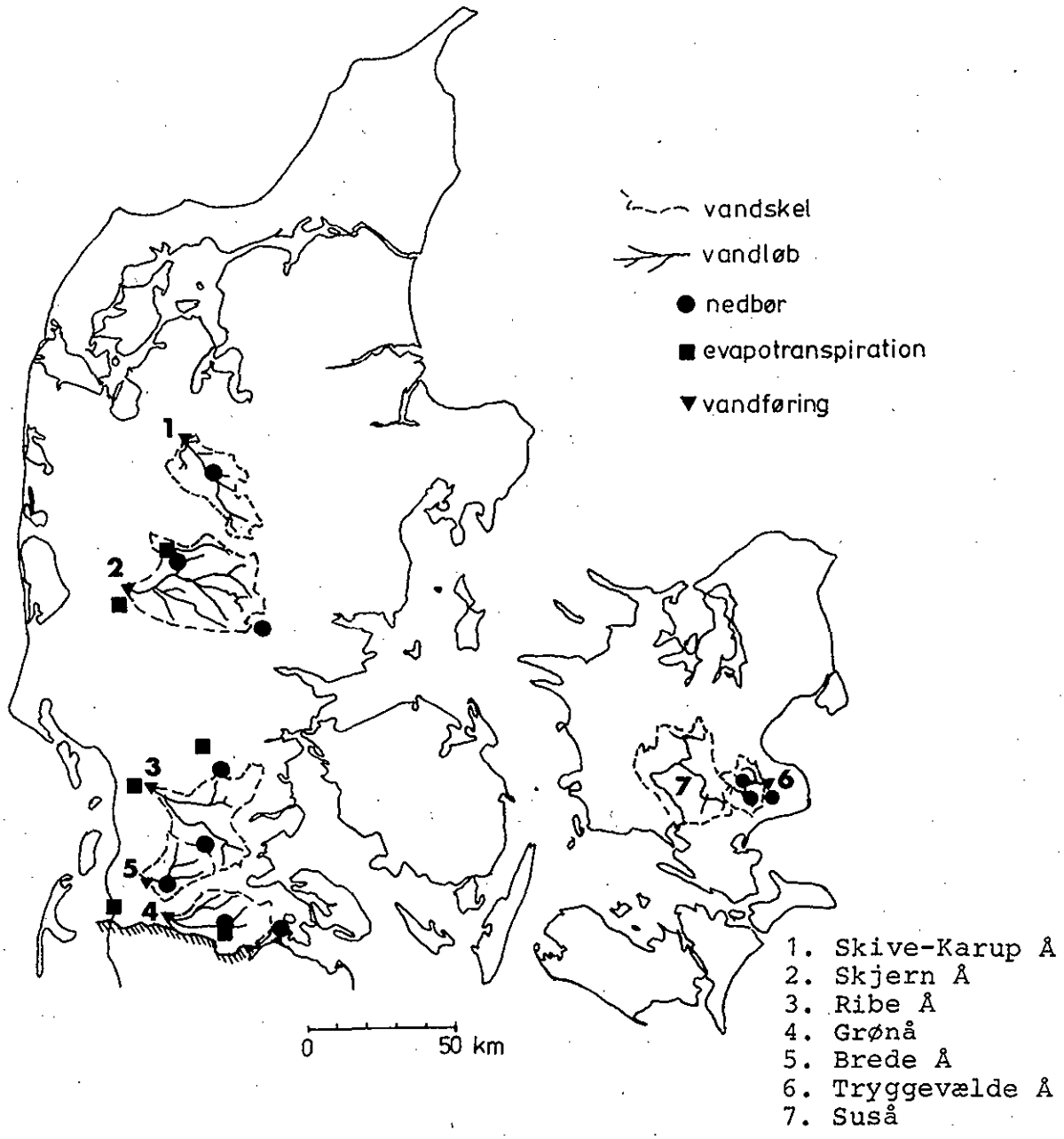
Endvidere kræves i kalibreringsperioden

4) Daglige vandføringsobservationer.

ad 1) Ved modelberegningerne anvendes en daglig nedbørsværdi for hele afstrømningsoplandet. Denne arealnedbør bør bestemmes ud fra mindst 2 nedbørsstationer inden for eller i umiddelbar nærhed af området.

ad 2) Temperaturdata benyttes i snerutinen. En enkelt temperaturstation er tilstrækkelig.

ad 3) Ved bestemmelse af fordampningsdata bør benyttes så mange stationer som muligt, idet der findes ret store lokale variationer i den ved måling fundne potentielle evapotranspiration. Såfremt et områdes fordampningsdata konstant bestemmes for højt eller for lavt, vil det ved kalibreringen medføre fysisk set mere eller mindre urimelige parametre (først og fremmest markkapaciteten L^*), hvorimod simuleringernes kvalitet bliver næsten upåvirkede heraf. Fordampningsmålinger eksisterer kun efter 1957, hvorfor fordampningsdata må estimeres, såfremt NAM anvendes før 1957. Dette kan f.eks. gøres ved anvendelse af Thorntwaite's metode, som beregner den potentielle evapotranspiration ud fra månedlige gennemsnitstemperaturer. En diskussion af fordele og ulemper ved Thorntwaite's formel er angivet i [12].



Figur 2.3.2 Kort over de afstrømningsområder, hvorpå NAM er anvendt.

2.3.4. Modelparametre

Ved modelopbygningsarbejdet er NAM blevet anvendt på 6 afstrømningsområder. Et kort over afstrømningsområderne og observationsstationernes beliggenhed er vist på figur 2.3.2. Uden at gå ind i en detaljeret geologisk beskrivelse af afstrømningsområderne kan det nævnes, at jordbunden er mest sandet ved Skive-Karup Å (90% hedeslette) og gennemgående lidt mindre sandet ved Skjern Å. Ved de tre sønderjyske åer er jorden noget federe end i Vestjylland ved Skjern Å, og ved Tryggevælde Å består jorden af moræne fra den

sidste istid med en gennemgående stor lerholdighed. Modelparametrene - bestemt ud fra hele det eksisterende datamateriale - for de 6 afstrømningsområder er angivet i tabel 2.3.1.

Betydningen af kalibreringsperiodens længde for sikkerheden i estimaterne på modelparametrene og for parametrenes stabilitet med tiden er blevet undersøgt på følgende måde. Med udgangspunkt i 24-års perioden 1946-69 er der ved hjælp af den tidligere omtalte automatiske kalibreringsrutine foretaget optimeringer af de 6 vigtigste parametre for Skjern Å på 24 etårs perioder, 12 toårs perioder, 8 treårs perioder, 6 fireårs perioder, 4 seksårs perioder og 3 otteårs perioder. Resultaterne er angivet i tabel 2.3.2. Tilsvarende analyser er udført for Grønå og Tryggevælde Å.

I det følgende gives en kort omtale af de enkelte parametre, deres fysiske betydning samt sikkerheden, hvormed de kan estimeres.

Magasinkapaciteter

U^*, L^* (mm) angiver de øvre grænser for den mængde vand, der kan opmagasineres i henholdsvis det allerøverste jordlag (incl. vegetationen) og i markvandszonen. Af de gennemregnede tilfælde ses det tydeligt, at magasinkapaciteterne er større, jo mere lerholdig jorden er. Den fysiske betydning af magasinkapaciteterne er således ret klar. Man kan dog ikke gå direkte ud i naturen og måle dem, idet de er afhængige af modelstrukturen, specielt den benyttede fordampningsrutine.
U^* og L^* er forholdsvis vanskelige at bestemme sikkert, når der kun er en kort kalibreringsperiode (< 5 år) til rådighed.

Snesmeltekonstant.

C_s (mm/^{o}C/dag) har stor betydning i forbindelse med snesmeltningssituationen, men er ellers uden indflydelse på modellen. C_s kan normalt sættes til 2,0 mm/^{0}C/dag.

Overfladenær afstrømning, Interflow.

C_{OF} er dimensionsløs og beliggende mellem 0 og 1. C_{OF} er en meget vigtig parameter, som angiver, hvor stor en del af overskudsnedbøren (den nedbør, der

ikke fordamper eller opsamles i det overfladenære magasin) der løber af som OF, og hvor meget der infiltrerer. C_{OF} ses ligesom magasinkapaciteterne at vokse signifikant med stigende lerholdighed i jorden. C_{OF} bestemmes meget sikkert ved en kalibrering selv over forholdsvis få år (< 5 år).

C_{IF} er dimensionsløs og beliggende mellem 0 og 1. C_{IF} har betydning for størrelsen af IF og for den tidslige recession i IF. C_{IF} er ikke en særlig vigtig parameter, og modellen er ikke særlig følsom over for ændringer i dens talværdi.

C_{L1}, C_{L2} er dimensionsløse og beliggende mellem 0 og 1. C_{L1} og C_{L2} kan fysisk opfattes som tærskelværdier for vandindholdet i markvandsmagasinet, under hvilke der ikke forekommer nogen IF henholdsvis OF afstrømning. Det kan være vanskeligt at se en så umiddelbar sammenhæng mellem disse parameterværdier og oplandenes forskellige karakteristika, som det er tilfældet med U^*, L^* og C_{OF}. C_{L1} og C_{L2} bliver imidlertid nogenlunde sikkert bestemt ved kalibreringen.

Grundvandsafstrømning.

C_{LG} er dimensionsløs og beliggende mellem 0 og 1. C_{LG} afspejler rent fysisk perkolationsforholdene. Såfremt der oven over grundvandsmagasinet findes impermeable lag, f.eks. moræneler som ved Tryggevælde Å, er C_{LG} større end 0. Hvis der derimod ikke er nogen perkolationsvanskeligheder, er $C_{LG} = 0$, som f.eks. på hedesletten ved Skive-Karup Å. I tilfælde hvor C_{LG} er større end 0, er det nødvendigt med en ret lang kalibreringsperiode (> 5 år) for at få en sikker bestemmelse af C_{LG}.

$C_{AREAL} = \frac{\text{grundvandsopland}}{\text{topografisk opland}}$ er ret væsentlig for vandbalanceforholdene, specielt ved de jyske vandløb, hvor hovedparten af vandmængden kommer fra grundvandet. C_{AREAL} bør ikke bestemmes ved den automatiske kalibreringsprocedure, selv om der mange gange kan være tvivl om grundvandsoplandets størrelse, men direkte ud fra kendskab til grundvandsskellenes beliggenhed.

Parameter		Skive-Karup Å	Skjern Å	Ribe Å	Grønå	Brede Å	Tryggevælde Å
Magasinkapaciteter (mm vand)	U^*	2 mm	6 mm	11 mm	12 mm	15 mm	18 mm
	L^*	60 mm	90 mm	100 mm	120 mm	140 mm	140 mm
Snesmeltekonstant	C_s	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag
Overflade-afstrømning	C_{OF}	0.09	0.20	0.45	0.45	0.60	0.75
	C_{L2}	0.18	0.65	0.60	0.70	0.45	0.50
Interflow	C_{IF}	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	C_{L1}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15	0.75
Grundvands-afstrømning	C_{AREAL}	0.90	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	C_{LG}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.30
Tidskonstanter	K_{OI}	4.1 dage	5.0 dage	8.0 dage	6.0 dage	6.0 dage	3.3 dage
	K_B	500 dage	385 dage	500 dage	100 dage	300 dage	100 dage
Oplandsareal	A	522 km^2	1056 km^2	680 km^2	579 km^2	292 km^2	131 km^2
Simuleringsperiode		1968-71	1946-71	1934-38 + 1970-74	1960-67	1925-29 + 1970-74	1961-62 + 1966-74

Tabel 2.3.1 Modelparametre for NAM.

Parameter	24 x (1 år) middel-værdi	spred-ning	12 x (2 år) middel-værdi	spred-ning	8 x (3 år) middel-værdi	spred-ning	6 x (4 år) middel-værdi	spred-ning	4 x (6 år) middel-værdi	spred-ning	3 x (8 år) middel-værdi	spred-ning
U^* mm	9.4	2.6	6.6	2.4	6.7	2.1	6.2	3.3	6.5	1.1	6.1	1.6
L^* mm	97	14	93	35	90	39	99	31	88	18	92	7
C_{OF}	0.18	0.06	0.19	0.05	0.20	0.04	0.20	0.03	0.19	0.01	0.20	0.01
C_{L2}	0.70	0.23	0.61	0.22	0.66	0.23	0.62	0.15	0.62	0.12	0.62	0.11
K_{OI}^{-1} dag^{-1}	0.23	0.13	0.22	0.06	0.23	0.10	0.21	0.04	0.20	0.03	0.20	0.03
$K_B^{-1} dag^{-1}$	0.0027	0.0017	0.0029	0.0008	0.0028	0.0009	0.0026	0.0005	0.0026	0.0008	0.0025	0.0006

Tabel 2.3.2 Resultater fra kalibreringer over forskellige tidsperioder.
Datagrundlag: Skjern Å 1946-69.

Tidskonstanter.

K_{OI}, K_B (dage) Routningen af OF og IF i vandløbssystemet tænkes at foregå som gennem et lineært reservoir med tidskonstant K_{OI}. Vandløbssystemet tænkes at bestå af vandløb samt naturlige og kunstige dræn. Tilsvarende beskrives grundvandsmagasinet ved et lineært reservoir med tidskonstant K_B. K_{OI} er voksende med vandløbssystemets længde og forgrenethed. K_{OI} bliver ret sikkert bestemt ved kalibrering selv ved korte perioder (< 5 år). K_B bliver primært bestemt af recessionen på afstrømningshydrografen i tørre sommermåneder. K_B er ret vanskelig at bestemme. En kalibreringsperiode på mindst 2 år er en absolut nødvendighed for at få bare et nogenlunde rimeligt skøn.

2.4. Kalibrering af NAM på Suså-området

2.4.1. Dataindsamling

Ved arbejdet med NAM inden for Suså-området er følgende datamateriale benyttet:

Daglige nedbørsobservationer indsamlet fra Meteorologisk Institut for stationerne

	Sorø Nord,	1950-53	Sorø, 1950-75
29-280	Sorø Syd,	1954-75	
29-260	Haslev,	1950-75	
29-210	Allindelille,	1956-75	
31-160	Rislev,	1959-75.	

Sidstnævnte station er på grund af manglende observationer erstattet af 31-140 Glumsø for perioden 01.12.70 - 31.03.74.

Daglige minimums- og maximumstemperaturer i frostperioden indsamlet fra Meteorologisk Institut for stationerne

	Sorø Nord,	1950-56
29-280	Sorø Syd,	1957-72
29-340	Drøsselbjerg,	1973-75.

Månedlige værdier for den potentielle evapotranspiration indsamlet fra den kgl. Veterinær- og Landbohøjskole for følgende stationer

Tystofte,	1957-75
Højbakkegård,	1957-75
6 IHD stationer på Stevns,	1967-75.

Daglige vandføringsobservationer indsamlet fra Det danske Hedeselskab. Samtlige eksisterende data fra perioden 1950-75 er benyttet, d.v.s.

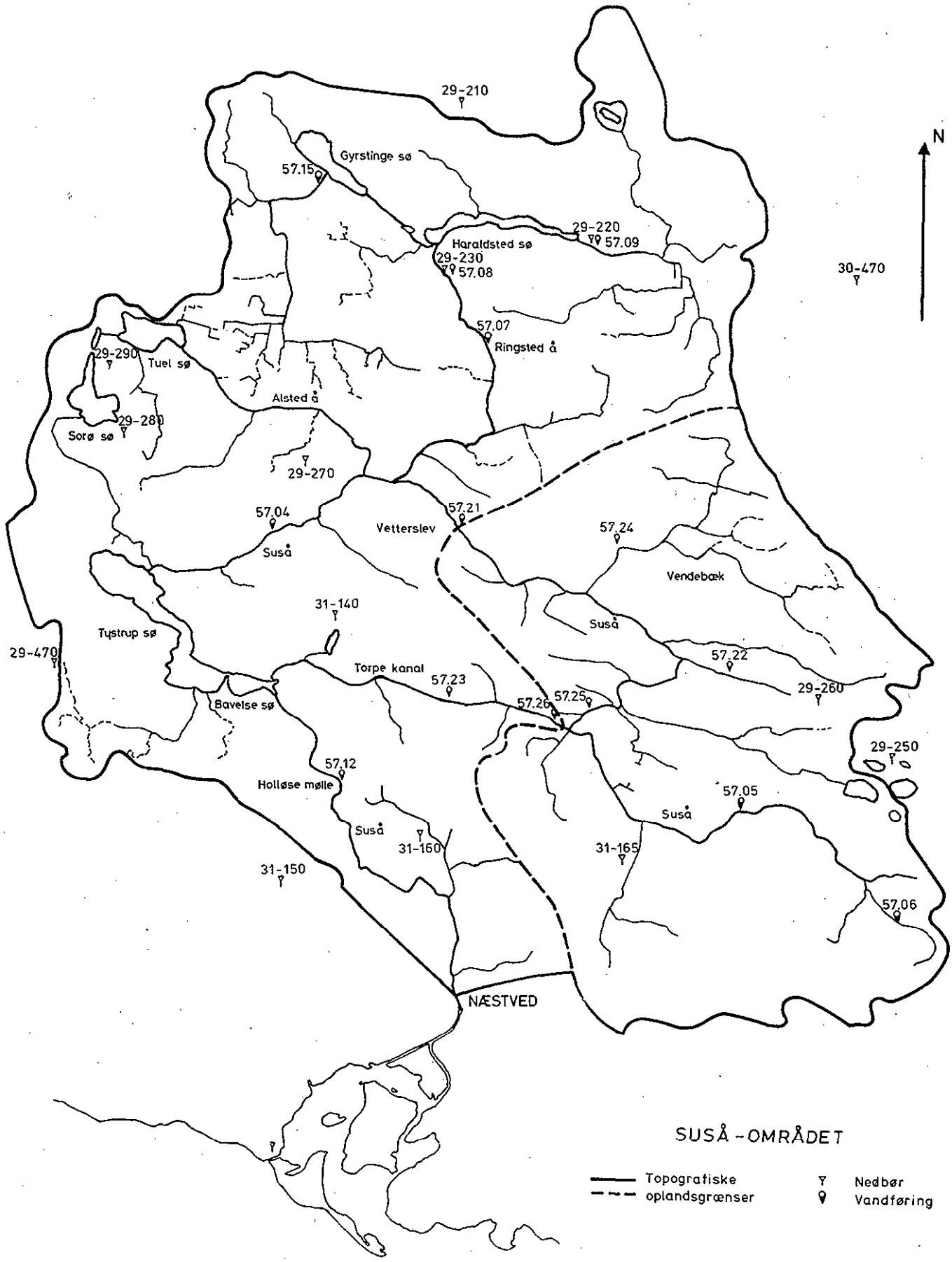
57.04	Suså, Næsbybro	01.11.73 - 31.12.75
57.05	Suså, Pindsobro	01.01.50 - 31.05.56
57.06	Suså, Rønnede	01.01.50 - 31.12.55
57.07	Ringsted Å, Torpet	01.01.50 - 31.12.56
57.08	Ringsted Å, Ll. Svenstrup	01.01.57 - 31.12.74
57.09	Vigersdal Å, Staveds bro	03.04.59 - 31.12.69
57.12	Suså, Holløse mølle	01.01.61 - 31.12.75
57.15	Frøsmose Å, Møllegård	01.03.61 - 31.12.66
57.21	Suså, Vetterslev	01.11.73 - 31.12.75
57.22	Gillesbækken, Levetofte	01.11.73 - 31.12.75
57.23	Torpekanalen, Skullerupbro	01.11.73 - 31.12.75
57.24	Lilleå, Sneslev	01.01.74 - 31.12.75
57.25	Suså, Fordelingsbygværket	01.11.73 - 31.12.75
57.26	Torpekanalen, Fordelingsbygværket	01.11.73 - 31.12.75

Desuden er resultaterne af nogle synkronmålinger i Suså-området stillet til rådighed af DDH. Disse målinger blev udført i august-september 1975 og omfattede 45 lokaliteter ud over de faste målestationer.

Placeringen af de benyttede nedbørs- og vandføringsstationer fremgår af figur 2.4.1.

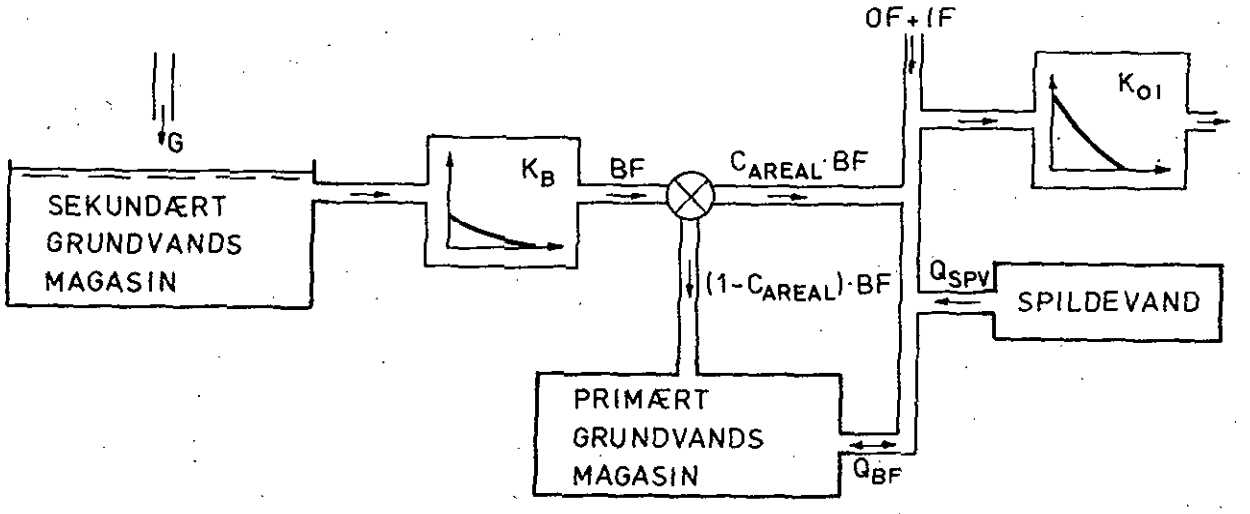
2.4.2. Speciel tilpasning af NAM til Suså-området

Ved arbejdet med NAM på Suså-området er der gjort brug af en betydeligt større hydrologisk datamængde end ved arbejdet med de øvrige 6 afstrømningsområder, hvorpå NAM har været anvendt. Specielt er grundvandsforholdene meget bedre belyst i Suså-området end i de øvrige områder. Derfor har det været muligt at forbedre beskrivelsen af afstrømningsforløbet ved at gøre grundvandsdelen af NAM mere detaljeret end i den generelle model.



Figur 2.4.1 Susåens afstrømningsområde.

I Suså-området er således anvendt den på figur 2.4.2 viste grundvandsdel til NAM, jfr. den generelle model, figur 2.3.1.



Figur 2.4.2 Den specielle grundvandsdel til NAM, som benyttes i Suså-området.

I denne grundvandsrutine opereres der med to grundvandsmagasiner. Det primære grundvandsmagasin er det af grundvandsmodellen, jfr. kapitel 1, beskrevne paleocæne reservoir. Det sekundære grundvandsmagasin, som er beliggende oven over det primære, tænkes at omfatte mindre, kvartære sand- og grusforekomster. Det sekundære grundvandsmagasin fungerer ligesom grundvandsmagasinet i den generelle model som et lineært reservoir med tidskonstanten K_B. Udstrømningen herfra, BF, fordeles mellem direkte tilskud til vandløbsafstrømningen, C_{AREAL}·BF, og perkolation til det primære grundvandsmagasin, $(1-C_{AREAL})$·BF.

C_{AREAL} bestemmes ud fra de i grundvandsmodellen forudsatte gennemsnitlige årlige nedsivningsbidrag til det primære magasin inden for de forskellige polygoner, således at perkolationen $(1-C_{AREAL})$·BF i gennemsnit over længere tidsrum har samme størrelse som de i tabel 1.5.6 angivne bidrag. Udstrømningen fra det primære grundvandsmagasin til vandløbene, Q_{BF}, beregnes af grundvandsmodellen jfr. kapi-

tel 1. Det bemærkes, at Q_{BF} kan være negativ svarende til en udsivning fra vandløbene til det primære grundvandsmagasin. Q_{BF} er således varierende med tiden; men eftersom Q_{BF} er lille i forhold til de øvrige afstrømningskomponenter OF, IF og BF, og eftersom Q_{BF} kun varierer 10-20% inden for en flerårig periode (jfr. afsnit 3.3), er Q_{BF} i de fleste NAM-beregninger holdt som en tidsuafhængig parameter, i overensstemmelse med tabel 1.5.4.

Samspillet mellem grundvandsmodellen og overflademodellen er i øvrigt uddybet i kapitel 3.

Der er endvidere taget hensyn til spildevandsudledningen ved indførelse af parameteren Q_{SPV}, som angiver den samlede mængde spildevandstilskud til vandløbene inden for et opland.

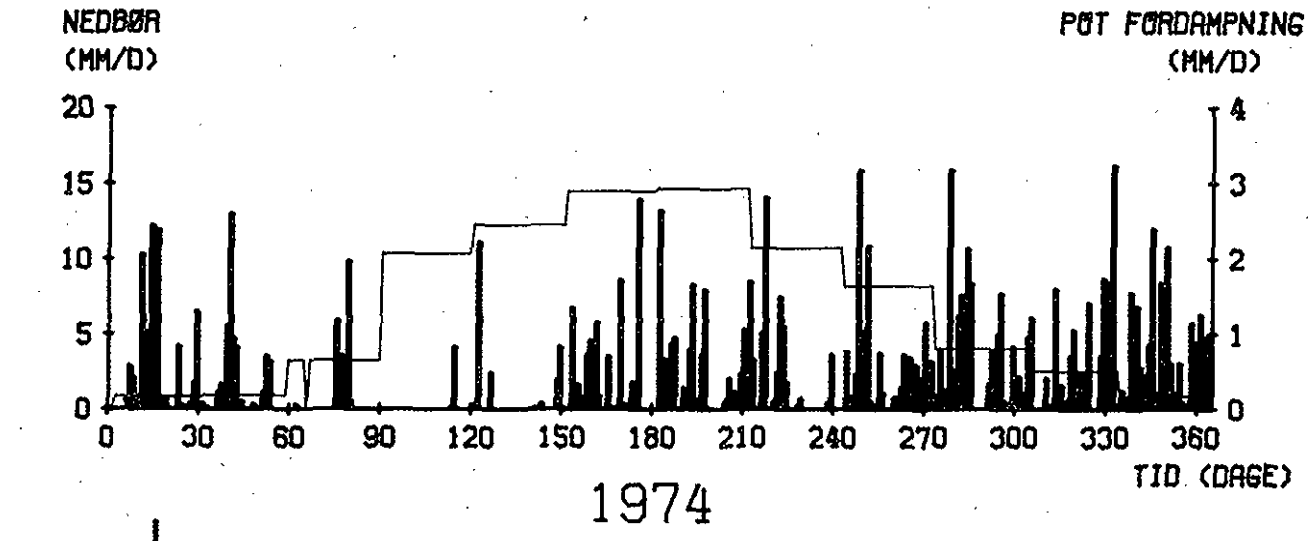
2.4.3. Kalibreringsresultater. Modelparametre

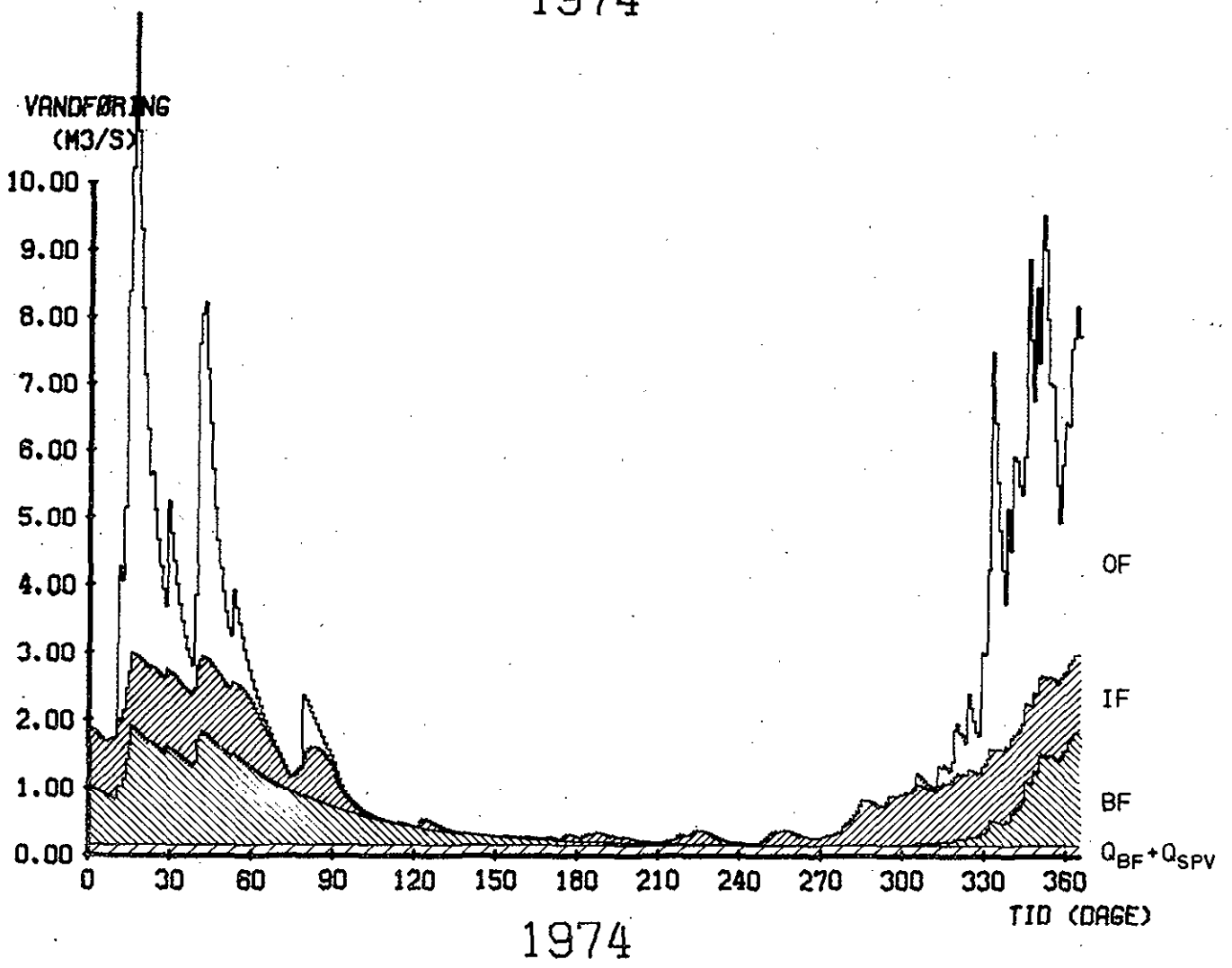
For at få et så differentieret billede af Suså-området som muligt samt for at udnytte den i det samlede datamateriale indeholdte information bedst muligt er NAM blevet kalibreret på så mange af Susåens delområder, som datamaterialet har tilladt. Ved kalibreringen er den tidligere omtalte automatiske kalibreringsrutine i vid udstrækning blevet anvendt, ligesom den i afsnit 2.3.4 beskrevne erfaring om modelparametrene er blevet udnyttet.

De ved kalibreringen på de enkelte deloplande opnåede modelparametre er angivet i tabel 2.4.1. På figur 2.4.3 er vist resultatet af en simulering fra Suså, Vetterslev 1974, hvor NAM's virkemåde er illustreret ved en plotning af de forskellige afstrømningskomponenter OF, IF, BF og $Q_{BF} + Q_{SPV}$ sammen med inputdataene nedbør og potentiel fordampning. Det bemærkes, at den potentielle fordampning sættes lig nul, når temperaturen er negativ (f.eks. dag 66 i 1974), således at man også på figuren kan aflæse, hvorvidt nedbøren formodes at falde som regn eller sne. Herefter er simuleringen af vandløbsafstrømningen med de i tabel 2.4.1 angivne parametre vist på figurerne 2.4.4 - 2.4.10.

Selv om variationerne i modelparametrene inden for Suså-området er betydeligt mindre end variationerne inden for de i tabel 2.3.1 nævnte deloplande, må de dog anses at være signifikante. I det følgende skal de enkelte deloplande samt kalibreringsresultaterne herfra kort omtales.

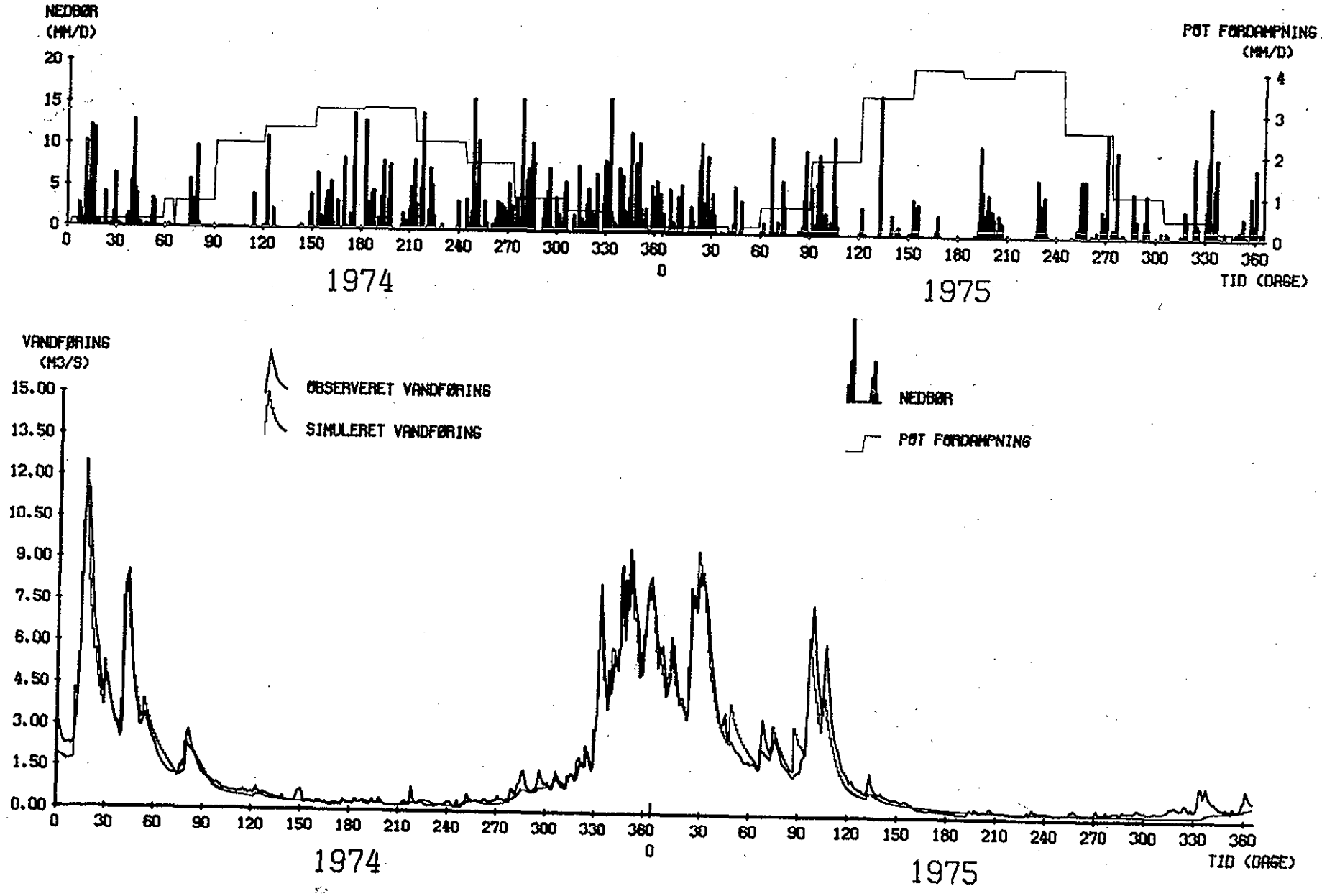
SUSÅ, VETTERSLEV





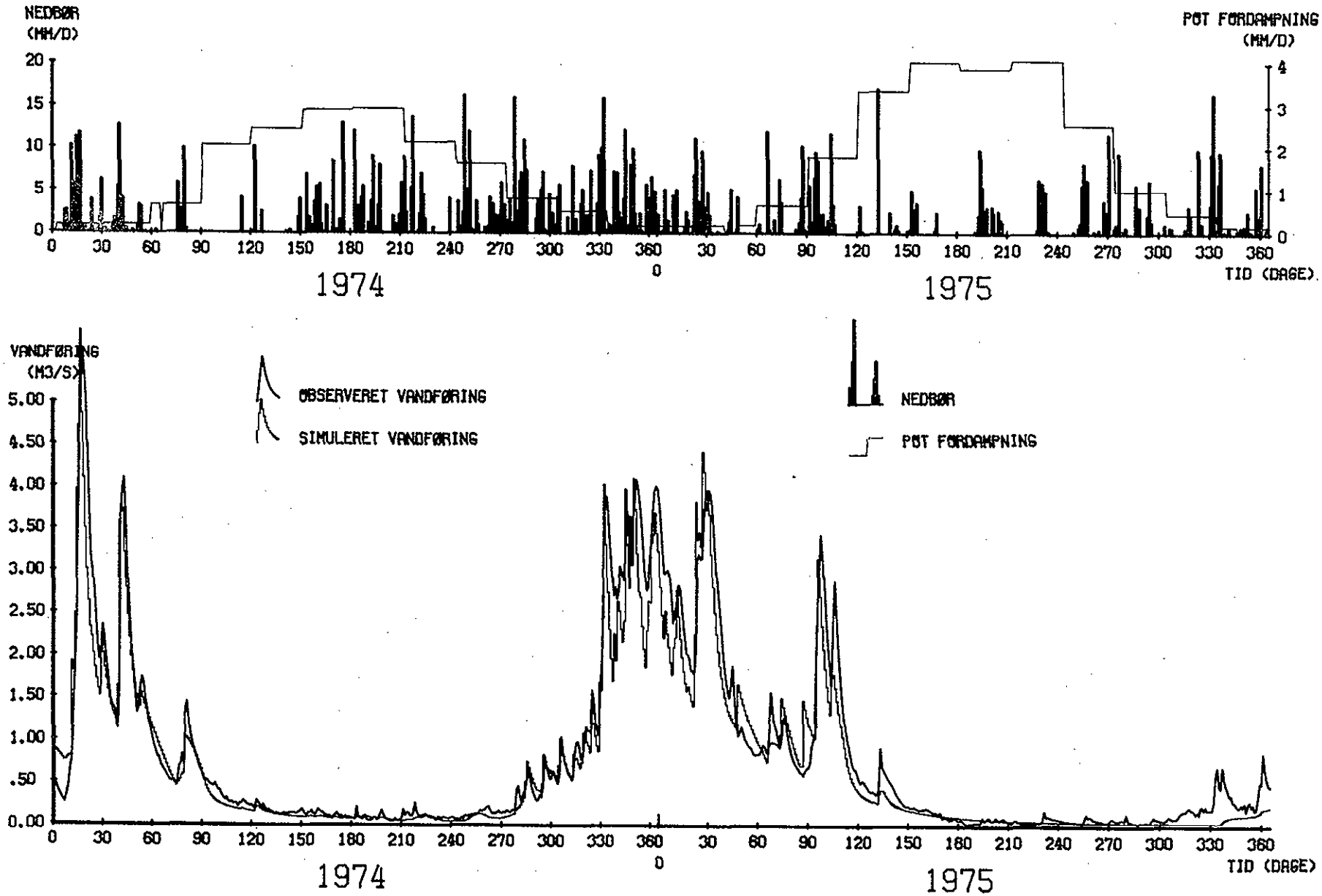
FIGUR 2.4.3 NAM-SIMULERING MED OPTEGNING AF DE FORSKELLIGE AFSTRØMNINGSKOMPONENTER

SUSÅ, VETTERSLEV



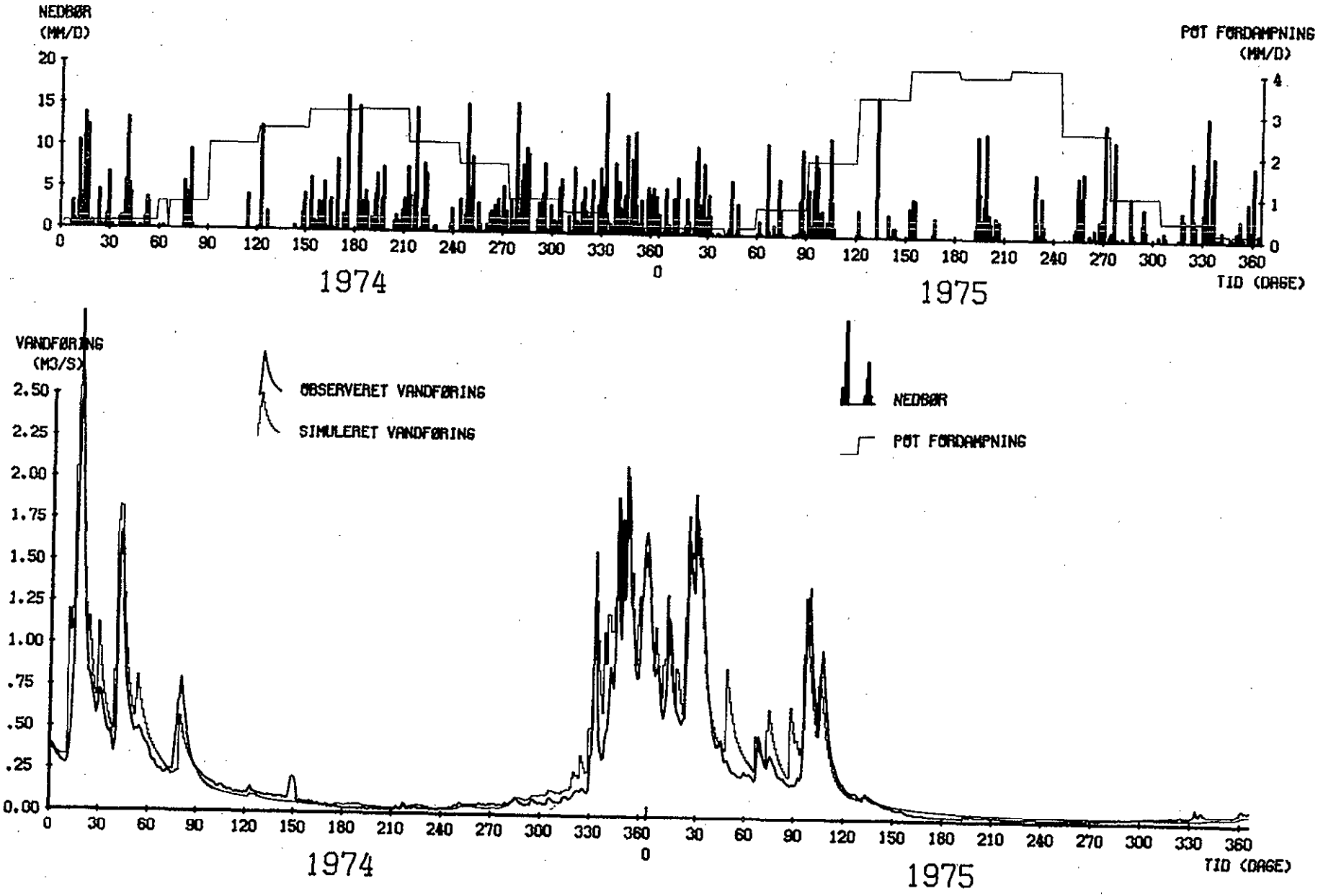
FIGUR 2.4.4 NAM-SIMULERING AF VANDLØBSAFSTRØMNING. 57.21-57.28 SUSÅ, VETTERSLEV

SUSÅ, FØRDELINGSBYGVÆRKET

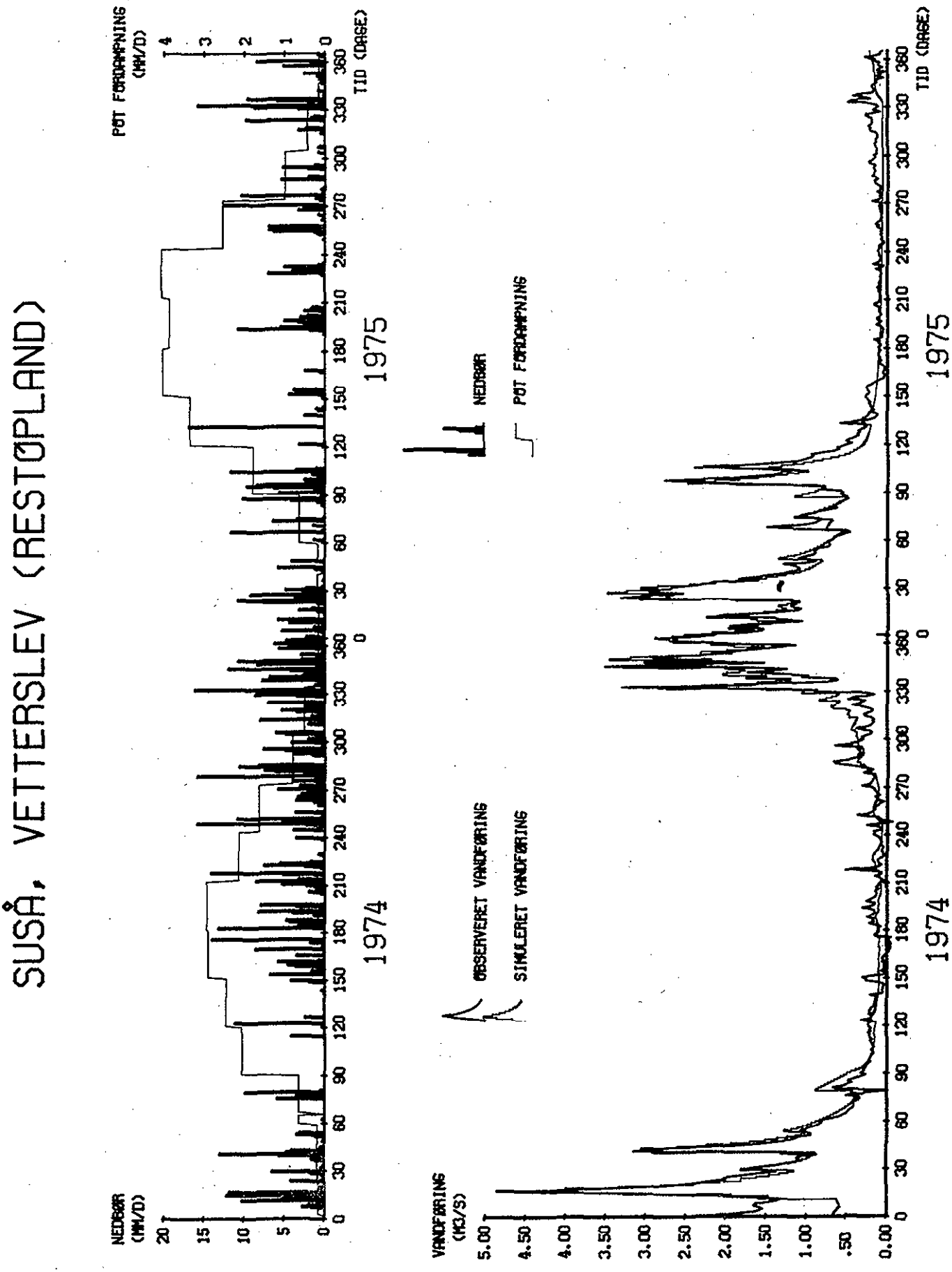


FIGUR 2.4.5 NAM-SIMULERING AF VANDLØBSAFSTRØMNING, 57.25 SUSÅ, FØRDELINGSBYGVÆRK

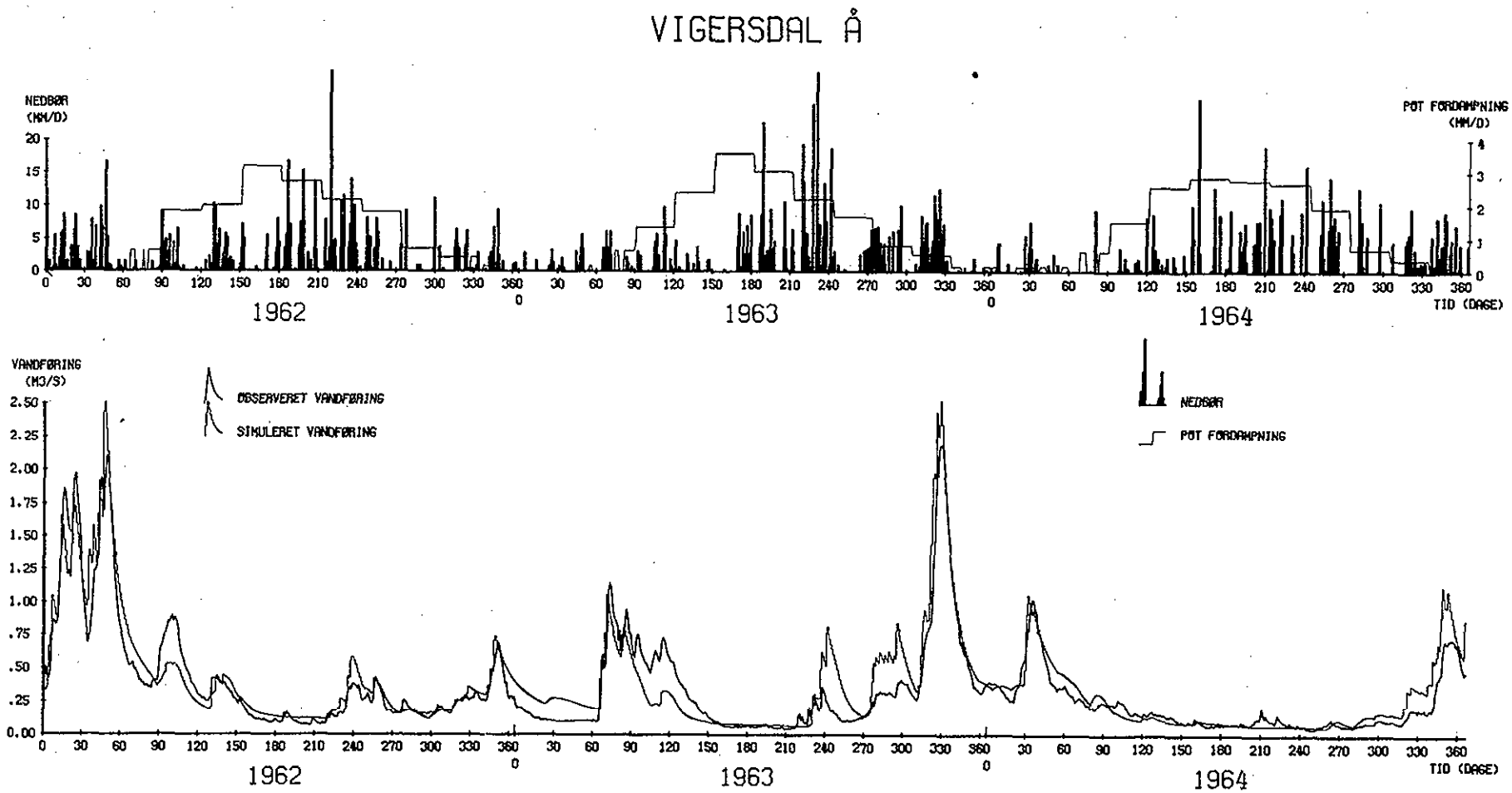
LILLEÅ



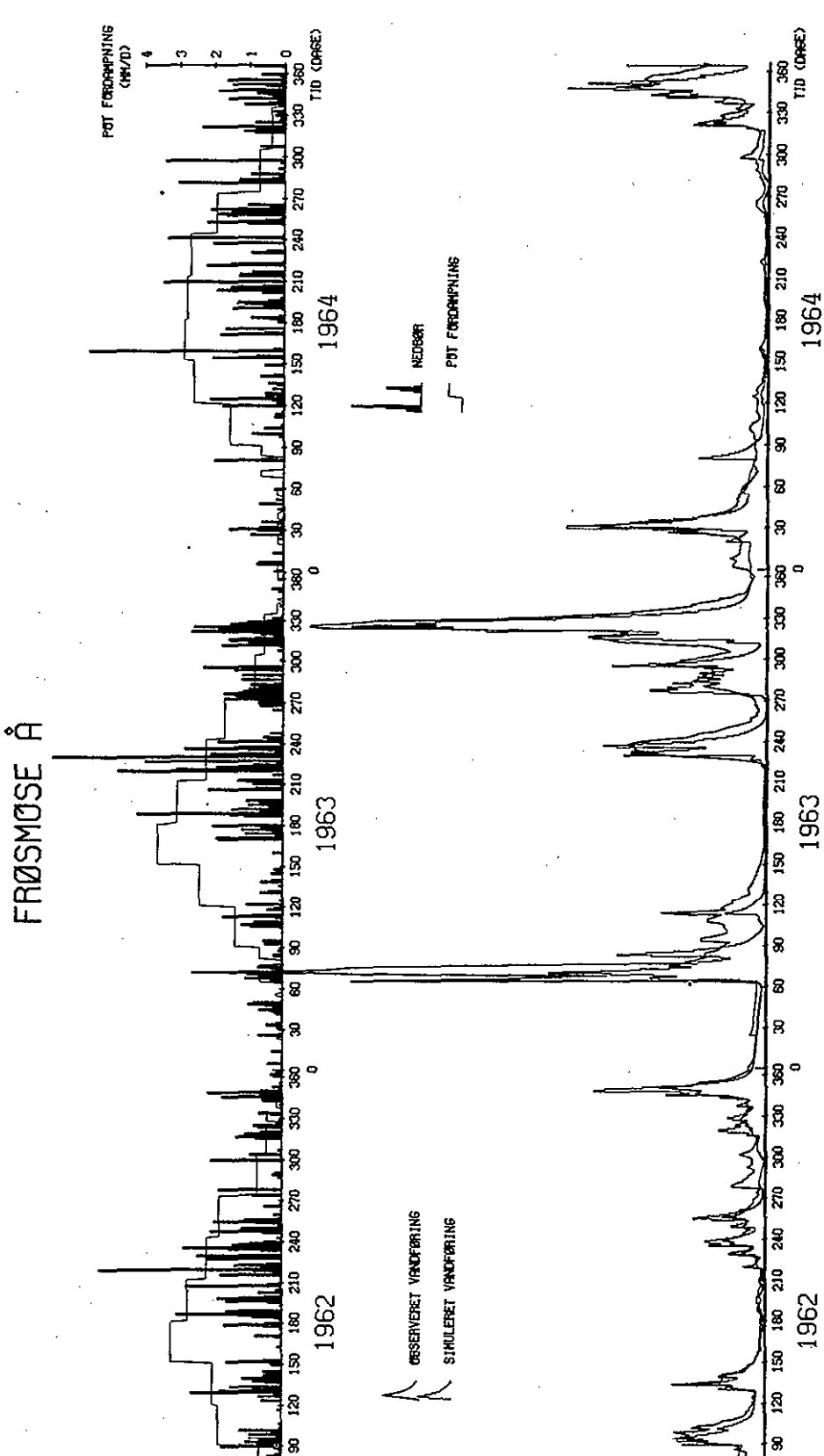
FIGUR 2.4.6 NAM-SIMULERING AF VANDLØBSAFSTRØMNING. 57.24 LILLEÅ, SNESLEV



FIGUR 2.4.7 NAM-SIMULERING AF VANDLØBSAFSTRØMNING. 57.21-(57.22+57.24+57.25) SUSÅ, VETTERSLEV (RESTØPLAND)



FIGUR 2.4.8 NAM-SIMULERING AF VANDLØBSAFSTRØMNING. S7.09 VIGERSDAL Å, STRAVEDS BRO



FIGUR 2.4.9 NAM-SIMULERING AF VANDLØBSAFSTRØMNING. 57.15 FRØSMØSE Å, MØLLEGÅRD

Parameter \ Opland		57.21+57.26 Suså, Vetterslev	57.25+57.26 Suså, Fordelings-bygværk	57.24 Lilleå, Sneslev	57.21-(57.22 +57.24+57.25) Suså, Vetterslev (Restopland)	57.07/57.08 Ringsted Å, Torpet/ LlSvenstrup	57.09 VigersdalÅ, Før Regnemark grundvands-indvinding	Stavedsbr. M.hensyntagen t.grundvands-indvinding	57.15 Frøsmose Å, Møllegård
Magasinkapaciteter (mm vand)	U^*	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm
	L^*	160 mm	150 mm	170 mm	170 mm	170 mm	180 mm	180 mm	170 mm
Snesmeltekonstant	C_s	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag	2 mm/°C/dag
Overfladenær afstrømning	C_{OF}	0.55	0.55	0.60	0.55	0.75	0.60	0.35	0.80
	C_{L2}	0.75	0.55	0.85	0.75	0.70	0.70	0.50	0.70
Interflow	C_{IF}	0.030	0.040	0.020	0.030	0.025	0.040	0.030	0.015
	C_{L1}	0.20	0.25	0.30	0.15	0.40	0.60	0.50	0.40
Grundvands-afstrømning	C_{AREAL}	0.83	1.00	0.80	0.68	1.00	1.00	0.31	1.00
	C_{LG}	0.70	0.70	0.70	0.70	0.60	0.60	0.50	0.85
Tidskonstanter	K_{OI}	5 dage	4 dage	4 dage	4 dage	10 + 7 dage	8.5 dage	8.5 dage	3.3 dage
	K_B	40 dage	40 dage	40 dage	40 dage	200 dage	100 dage	30 dage	65 dage
Areal	A	256 km^2	111 km^2	47 km^2	92 km^2	205 km^2/ 195 km^2	72 km^2	72 km^2	44 km^2
Spildevands-tilskud	Q_{SPV}	40 l/s	0	5 l/s	0	0	0	0	0
Det primære grundvandsmagasin	Q_{BF}	110 l/s	35 l/s	20 l/s	55 l/s	50 l/s	50 l/s	0	0
Simuleringsperiode		1974-75	1974-75	1974-75	1974-75	1950-74	1960-64	1965-69	1961-66

Tabel 2.4.1 Modelparametre for deloplande i Suså-området.

Suså, Vetterslev afstrømningsområdet

En del af Susåens vandføring løber ved et fordelingsbygværk ind i Torpe Kanal, som er en mere end hundrede år gammel gravet kanal, bygget med det formål at formindske oversvømmelsesgenerne længere nedstrøms i Susådalen. Vandføringsmålestationerne er her placeret således, at 57.25 måler den del af vandet, som fortsætter i Susåen, mens 57.26 måler det, der løber ind i Torpe Kanal.

Opstrøms for fordelingsbygværket er grundvandsforholdene ikke så velbelyste som i den øvrige del af Suså-området, idet dette opland ligger uden for det af grundvandsmodellen beskrevne område. Følgelig er beskrivelsen af grundvandsforholdene i dette område behæftet med en større usikkerhed end i resten af Suså-området. Nærværende beskrivelse af grundvandsforholdene tager således hverken hensyn til grundvandsindvindingen ved Pindsobro på ca. 2 mill.m^3/år eller til vandudvekslingen med de tilgrænsende områder.

Inden for den del af Susåens opland, som er beliggende opstrøms for Vetterslev, er der kalibreret på deloplandene

57.21 + 57.26	Suså, Vetterslev	, 256 km^2
57.25 + 57.26	Suså, Fordelingsbygværk	, 111 km^2
57.24	Lilleå, Sneslev	, 47 km^2
57.21 - (57.22 + 57.24 + 57.25)	Restopland	, 92 km^2

Deloplandet 57.22 Gillesbækken med et areal på 6 km^2 har det ikke været muligt at kalibrere helt tilfredsstillende. Dette skyldes primært, at vandføringen i Gillesbækken fuldstændigt er domineret af spildevandsudledning og regnvandsafstrømning fra Haslev by og sekundært, at oplandet er så lille.

Ud fra de på figurerne 2.4.4 - 2.4.7 viste simuleringer over afstrømningsforløbet i de 4 forskellige deloplande ses det, at der er en udmærket overensstemmelse mellem den observerede og den af NAM simulerede vandføring. Det bemærkes, at de "observerede" data fra restoplandet på 92 km^2 er beregnet ud fra observationer fra 4 stationer og som følge heraf er behæftet med en væsentligt større usikkerhed end direkte målte vandføringsdata. Af simuleringen på figur 2.4.7 fremgår det, at usikkerheden på vandføringsdataene har størst betydning i perioder med små vandføringer, men at der er en udmærket overensstemmelse mellem "observeret" og simuleret vandføring i perioder med stor vandføring.

Hvad angår variationerne i modelparametrene inden for Suså, Vetterslev oplandet bemærkes det, at markkapaciteten, som er bestemt af U^* og L^*, er mindre i området opstrøms for fordelingsbygværket end i resten af oplandet. Tilsvarende er overfladeafstrømningsdelen, som i det væsentligste er bestemt af C_{OF}, mindst i det opstrøms område, ligesom interflowdelen her er noget større. Disse variationer stemmer udmærket overens med den kendsgerning, at jordbundsforholdene i området opstrøms for Holmegårds Mose må siges at være gennemgående mere sandede end i den nedstrøms del af området - jfr. omtalen af modelparametrene i afsnit 2.3.4.

Det bemærkes, at den lille vandføringstop, som er observeret omkring dag 150 i 1974, jfr. figurerne 2.4.4, 2.4.6 og 2.4.7, stammer fra den i kapitel 1 omtalte 4-dages prøvepumpning, hvor de oppumpede vandmængder blev ledt ud i vandløbene.

Ringsted Å afstrømningsområde

Inden for Ringsted Å's opland er NAM kalibreret på deloplandene

57.07/57.08	Ringsted Å	, 195 km^2/205 km^2
57.09	Vigersdal Å	, 72 km^2
57.15	Frøsmose Å	, 44 km^2

Den egentlige kalibrering på Ringsted Å er foretaget i perioden 1950-64, d.v.s. før Regnemark grundvandsindvindingen startede. Tidskonstanten K_{OI} er ved Ringsted Å angivet til 10 dage + 7 dage. Hermed menes, at vandet først routes gennem et lineært reservoir (vandløbssystemet) med en tidskonstant på 10 dage og herefter gennem et andet lineært reservoir (søerne) med en tidskonstant på 7 dage.

Ved 25-års simuleringen af Ringsted Å på figur 2.4.10 er perioden med manglende vandføringsdata vist som "huller" i den observerede vandføring. Ud fra simuleringen bemærkes at det ofte vil være muligt at udfylde "huller" i vandføringsdataene med simulerede værdier, se f.eks. april og juni 1967. Samtidig bemærkes det, at en nedbør-afstrømnings-model kan benyttes som et redskab til kvalitetskontrol med vandføringsdata, idet man ved hjælp af en sådan model kan udpege perioder med stor uoverensstemmelse mellem observerede og simulerede værdier, hvor der således kan være tale om usikre vandføringsdata, se f.eks. februar 1958. Endelig bemærkes

det, hvorledes vandføringen i Ringsted Å er blevet kraftigt reguleret, efter at Haraldsted og Gyrstinge søerne i 1971 blev taget i brug som reguleringsmagasiner i forbindelse med overfladevandsindvinding.

Ud fra de på figurerne 2.4.8 - 2.4.10 viste simuleringer over afstrømningsforløbet i de 3 deloplande fremgår det, at der generelt er en god overensstemmelse mellem den observerede og den af NAM simulerede vandføring. En undtagelse herfra er dog Frøsmose Å i 1963, hvor den observerede vandføring er væsentligt større end den simulerede vandføring. Der er dog grund til at formode, at denne uoverensstemmelse primært skyldes usikkerhed ved vandføringsdataene, idet summen af de observerede vandføringer i Frøsmose Å og i Vigersdal Å i marts 1963 er væsentligt større end den observerede vandføring i Ringsted Å i det samme tidsrum.

Kalibreringen af NAM på Vigersdal Å og Frøsmose Å samt en diskussion af konsekvenserne af Regnemarkværkets grundvandsindvinding på afstrømningsforløbet i Vigersdal Å er uddybet i kapitel 6, hvorfor der på dette sted kun skal drages en sammenligning mellem modelparametrene her og i Suså, Vetterslev oplandet. Markkapaciteterne er stort set ens i de to områder. Tidskonstanterne varierer en del, hvilket for K_{OI}'s vedkommende kan forklares ud fra vandløbssystemets forskellige udformning (længde, forgrening, fald) i deloplandene. Frøsmose Å er karakteriseret ved en større del overfladenær afstrømning og en mindre interflowdel end andre oplande i Suså-området.

2.5. Vurdering af modellen og dens anvendelighed i Suså-området

På baggrund af de indhøstede erfaringer med NAM fra såvel Suså-området som fra andre danske afstrømningsområder, kan der konkluderes følgende med hensyn til modellens anvendelighed:

1. NAM er en generelt anvendelig model, idet den er i stand til at simulere afstrømningsforløbet i danske vandløb med vidt forskellige karakteristika.
2. Variationen i modelparametrene mellem de forskellige afstrømningsområder kan i vid udstrækning forklares ud fra forskelle mellem områdernes geologiske/hydrologiske karakteristika.

3. De svageste punkter ved den generelle model er dens beskrivelse af frost- og sneperioder samt beskrivelsen af grundvandsforholdene. I denne undersøgelse er afstrømningens tidslige variation i frost- og sneperioder af mindre interesse, mens NAM's beskrivelse af grundvandsforholdene bliver væsentligt forbedret ved benyttelse af den i afsnit 2.4.2 beskrevne specielle NAM-grundvandsdel for Suså-området.
4. Kalibreringen af NAM på deloplandene i Suså-området har givet fine resultater, jfr. afsnit 2.4.3. Desværre har der fra de fleste af deloplandene kun været vandføringsdata til rådighed for en 2-årig periode, hvilket er en ret kort kalibreringsperiode. Det ville have været ønskeligt med en uafhængig testperiode, så de opnåede modelparametre kunne have været afprøvet på nogle flere data. Der gives muligheder herfor i forbindelse med det hydrologiske forskningsprojekt i Susåens opland, "Susåprojektet", som efter planen skal foregå i tidsrummet 1977-82.

   På det nuværende grundlag
   - hvor kalibrering på 7 deloplande inden for Suså-området, heraf et med en kalibreringsperiode på 25 år, giver udmærket overensstemmelse mellem parameterværdierne samt tilfredsstillende simuleringer, og
   - hvor de opnåede parameterværdier fra Suså-området stemmer udmærket overens med de erfaringer om modelparametrene, der er opnået ved at anvende NAM på 6 andre afstrømningsområder,

   må NAM, med de opnåede modelparametre, anses som velegnet til at beskrive afstrømningsforløbet i Suså-området.
5. NAM må følgelig siges at være et absolut brugbart redskab i en undersøgelse som nærværende. Det bør dog bemærkes, at den nuværende model ikke skal betragtes som en færdigudviklet model for nedbør-afstrømningsforløbet, men at modelarbejdet bør fortsættes i takt med den øgede viden, der forhåbentlig opnås om de delprocesser, modellen beskriver.

3. HYDROLOGISK SAMSPIL MELLEM OVERFLADEVAND OG GRUNDVAND

3.1. Hydrogeologisk beskrivelse af de kvartære formationer

Nedenstående vurderinger over hydrogeologiske forhold i de kvartære formationer bygger på oplysninger fra

a) Basisdatakortet (bilag 1) og DGU's borearkiv.
b) Boreprofiler fra geotekniske undersøgelser i området foretaget af Danmarks Geotekniske Institut (DGI).
c) Karteringskort over jordbundsforholdene i 1 m dybde, fremstillet af DGU.

Da boringerne på basisdatakortet (bilag 1) ofte repræsenterer en forenklet gengivelse af den kvartære lagserie, og da boringerne har relativt store indbyrdes afstande, hvilket yderligere vanskeliggør en vurdering af de kvartære lags rumlige udstrækning, har det for at kunne supplere basisdatakortet været nødvendigt at fremskaffe tætliggende boringer med små prøveudtagningsintervaller i kvartæret.

Sådanne boringer er fremskaffet hos DGI, der har udført geotekniske undersøgelser, som giver et detaljeret billede af de kvartære lags sammensætning i de undersøgte områder.

Oplysningerne fra DGI omfatter ca. 500 boreprofiler, sonderinger, pejlinger af grundvandsstand m.v. udført siden 1960. Størstedelen af undersøgelserne er knyttet til Vestmotorvejens linieføring og Sydmotorvejens brosteder. Enkelte boringer er dog placeret mere centralt i området, bl.a. i Ørslev, Sandby, Glumsø og Haslev.

Hovedparten af de kvartære formationer består af moræneler, som dog næsten overalt er beskrevet som sandet - til tider meget sandet og stenet. Nogle steder observeres egentlige sandlag (smeltevandsaflejringer) ofte af en mægtighed på 0.5 - 2 m. Lokalt kan permeabiliteten således være ret stor, selv om den generelt må formodes at være meget varierende såvel horisontalt som vertikalt. I mange af de ofte 8-10 m dybe DGI-boringer er der registreret et grundvandsspejl. Eftersom disse boringer intetsteds er ført ned til de prækvartære formationer, må det her observerede grundvandsspejl i alle tilfælde være knyttet til sekundære grundvandsforekomster. Tryknivеauet i disse sekundære grundvandsmagasiner er

overalt beliggende over eller omkring trykniveauet i det underliggende primære grundvandsmagasin.

I Regnemark-området findes der som omtalt i afsnit 1.5.1.3 betydelige sandforekomster. Langs Vestmotorvejens linieføring, som løber gennem dette område, er der gennem et par år omkring 1966 foretaget løbende registreringer af det sekundære trykniveau med 100-200 meters intervaller. Herved er det sekundære trykniveau konstateret at være 10-20 m højere end det primære. De hydrogeologiske betingelser for lækage i Regnemark-området ses således at være til stede.

I Haslev-området er der observeret ret mægtige forekomster af smeltevandssand. De sekundære grundvandsforekomster har også her et trykniveau, som er betydeligt (op til 20 m) højere end trykniveauet i det primære grundvandsmagasin. Forudsætningerne for i grundvandsmodellen at regne med en nedsivning ved Haslev, jfr. kapitel 1, er således opfyldte, nemlig for det første sandforekomster som betingelse for en infiltration og for det andet sekundære grundvandsforekomster med et tilstrækkeligt højt trykniveau, hvorfra vandet kan sive ned til det primære grundvandsmagasin.

Ved DGI-undersøgelserne ved Glumsø, Sandby og Ørslev er trykniveauforskellen mellem det primære grundvandsmagasin og eventuelle sekundære forekomster de fleste steder på nogle få meter, hvilket viser, at der ikke er lige så gunstige hydrogeologiske betingelser for lækage i det centrale område som ved Regnemark og Haslev.

Ovennævnte beskrivelse ses således på udmærket måde at underbygge de forudsætninger, der i kapitlerne 1 og 2 er gjort med hensyn til tilstedeværelse af sekundære grundvandsforekomster og muligheder for lækage/nedsivning til det primære grundvandsmagasin.

3.2. Vandudveksling mellem det primære grundvandsmagasin og vandløbene

3.2.1. Temperaturmålinger

Grundvandets temperatur er 8-10° og meget lidt afhængig af årstiden, hvorimod åvandets temperatur kan variere mellem 0° om vinteren og mere end 20° om sommeren. Som følge af temperaturforskellen mellem åvand og grundvand skulle det i princippet være muligt

ved temperaturmålinger i vandløbet og bundsedimentet at udpege de vandløbsstrækninger, hvor der foregår en grundvandsoptrængning. Derimod kan en sådan teknik ikke benyttes til at udpege strækninger med nedsivning af åvand til grundvandsmagasinet.

ISVA har foretaget nogle temperaturmålinger på visse i forvejen udvalgte vandløbsstrækninger. Undersøgelsen havde to hovedformål:

1) For det første at efterprøve, hvorvidt temperaturmålinger af vand og bundsediment kan benyttes til påvisning af strækninger med og strækninger uden grundvandsoptrængning.
2) For det andet at bekræfte/afkræfte nogle af de konklusioner, der er draget på grundlag af eksisterende datamateriale vedrørende vandudveksling mellem vandløb og primært grundvandsmagasin.

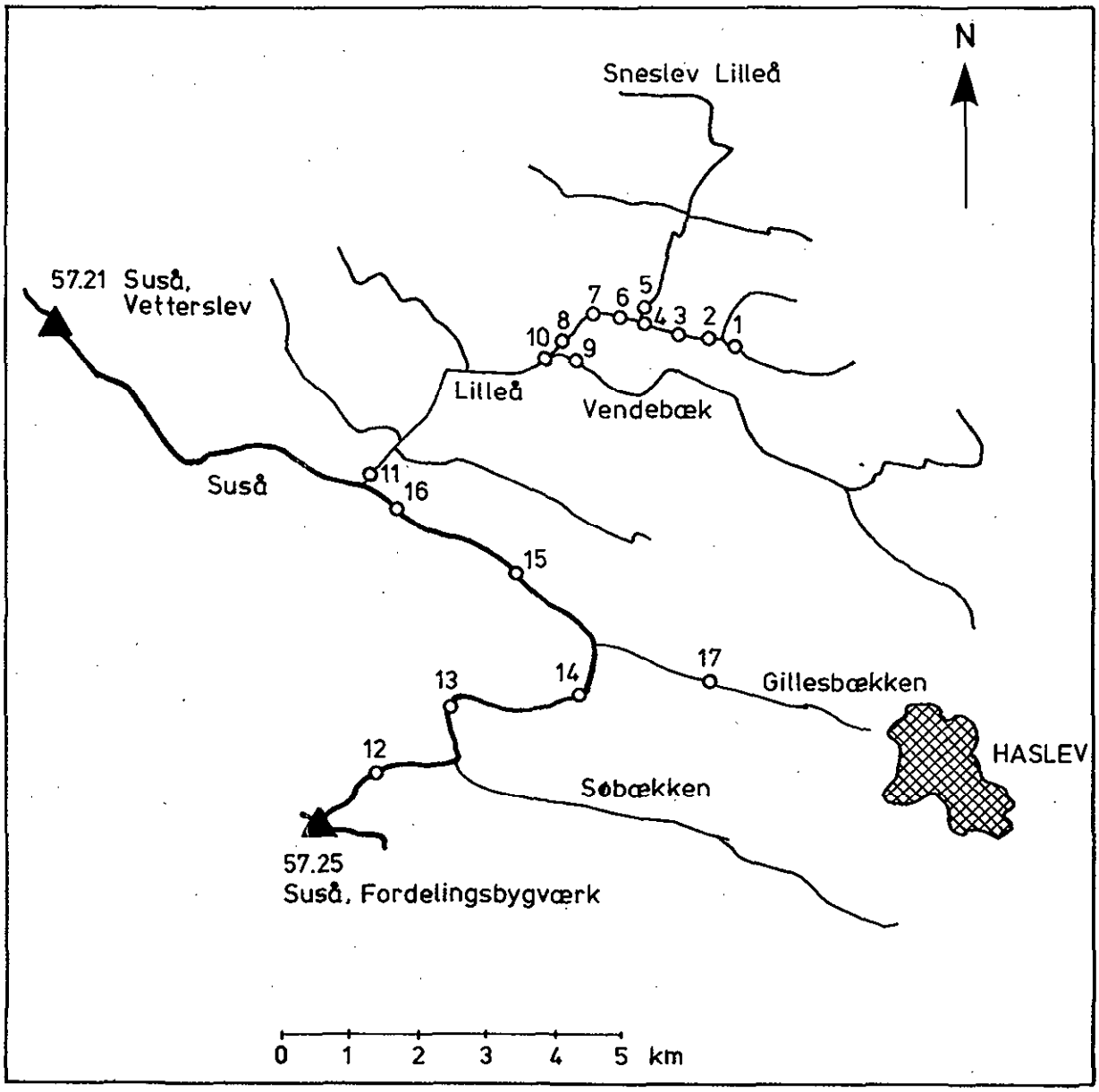
Målingerne blev foretaget den 28. januar 1977. Lufttemperaturen varierede denne dag kun mellem -1 og -2°C. I de umiddelbart foregående dage var der på grund af tø sket en stor afsmeltning af sne, hvorfor der var ret meget vand i vandløbene. På udvalgte lokaliteter blev der foretaget målinger af vandløbstemperaturen og af bundsedimentets temperatur. Målestederne er angivet på figur 3.2.1 og resultaterne i tabel 3.2.1. Bag hver af de i tabellen anførte temperaturer ligger flere målinger; specielt ved bundsedimenttemperaturen, hvor der ved nogle målestationer kunne observeres temperaturforskelle i bundsedimentet mellem sandbund og ler/dyndbund, selv med afstande på mindre end 1 m mellem målepunkterne.

Af resultaterne i tabel 3.2.1 fremgår det, at vandtemperaturen i åløbene på visse strækninger (station 1-4 og 6-8) er stigende i strømretningen, mens temperaturen på andre strækninger stort set holder sig konstant. På de strækninger, hvor temperaturen var stigende i strømretningen, konstateredes endvidere nogle steder forskelle mellem bundsedimentets og vandets temperatur - mest udpræget ved stationerne 4 og 7. En vurdering af bundens beskaffenhed synes at bekræfte en formodning om en grundvandsoptrængning koncentreret omkring lokale sand- og grusforekomster i morænen. Det kan herudfra konkluderes, at der finder en grundvandsoptrængning sted på en strækning i Lilleåen opstrøms for Vendebækken samt sandsynligvis på visse steder i Susåen, hvor det dog ikke på grund af den store vandføring gav anledning til målelige temperaturfor-

Station nr. jfr. figur 3.2.1	Måle-tidspunkt kl.	Vand-temperatur (°C)	Temperatur i bund-sedimentet (°C)	Bundens beskaffenhed
1	09.45	1.4	1.6	dynd
2	09.55	1.6	1.8	sand
3	10.05	1.7	1.8	dynd
4	10.45	1.8	2.5 - 2.8	sand
5	10.35	0.6	0.6 - 1.0	sand/dynd
6	11.00	1.1	1.1	ler
7	11.20	1.3	1.4 - 2.0	sand
8	13.00	1.4	1.4	sand/ler
9	12.30	1.4	1.4	ler
10	12.45	1.4	1.4	sand/ler
11	16.00	1.4	1.4	dynd
12	14.15	0.8	0.8	sand/dynd
13	14.45	0.6	0.6	sand
14	15.05	0.8	0.8 - 1.0	sand/dynd
15	15.40	0.8	0.8 - 1.2	sand/dynd
16	16.25	0.8	0.8	sand/ler
17	15.30	1.3	1.3	sand/grus
KV-boring nr. 1179		7.5		
KV-boring nr. 1187		7.5		
KV-boring nr. 1178		8.0		

Tabel 3.2.1 Vandtemperatur og bundsedimenttemperatur observeret den 28.01.1977 ved Susåen.

skelle. Det bemærkes, at disse konklusioner er i overensstemmelse med resultaterne af tidligere temperaturmålinger samt synkrone vandføringsmålinger, [4].



Figur 3.2.1 Skitse med de 17 lokaliteter, hvor der blev foretaget temperaturmålinger den 28.01.1977.

Eftersom vandføringen den pågældende dag var forholdsvis stor og temperaturforskellene i vandløbene forholdsvis små, vil en beregning af grundvandstilskuddet på baggrund af disse resultater være behæftet med en stor unøjagtighed. Kvantitative beregninger af grundvandstilskuddet på baggrund af temperaturmålinger kan imidlertid påregnes at være behæftet med en væsentligt mindre usikkerhed, såfremt målingerne foretages om sommeren, hvor temperaturforskellen mellem åvand og grundvand er lige så stor som om vinteren,

og hvor der desuden er så små vandføringer, at en betragtelig del heraf skyldes optrængende grundvand. Det kan endvidere anbefales, at en mere omfattende undersøgelse med temperaturmålinger som her skitseret bliver foretaget samtidig med synkronmålinger af vandføringerne.

3.2.2. Modelbeskrivelse af vandudvekslingen

Vandudvekslingen Q_{BF} mellem vandløbene og det primære grundvandsmagasin er afhængig af grundvandets trykniveau h_{BF}, åvandspejlets kote h_V samt permeabilitetsforholdene i zonen mellem vandløbet og grundvandsmagasinet. Permeabilitetsforholdene er meget varierende og stærkt afhængige af lokale geologiske forhold, hvorfor vandudvekslingen i grundvandsmodellen inden for hver polygon beskrives ved følgende simple lineære sammenhæng

$$Q_{BF} = K(h_{BF} - h_V)$$

hvor K'erne er fundet ud fra kendskab til $(h_{BF} - h_V)$ og Q_{BF} (se tabel 1.5.4). K kan opfattes som et mål for de vertikale permeabilitetsforhold inden for den enkelte polygon.

Der er således bestemt en K-værdi for hver af grundvandsmodellens polygoner. Disse polygonkonstanter er herefter benyttet ved forudsigelser af ændringerne i vandudvekslingen som følge af ændringer i grundvandsmagasinets trykniveau (årstidsvariationer, sænkninger som følge af oppumpning m.v.).

3.3. Model for årstidsfluktuationer i grundvandets trykniveau

Som omtalt i afsnit 1.5.5.3 er årstidsfluktuationerne i det primære grundvandsmagasins trykniveau simuleret ved en sammenkøring af overfladevandsmodellen (NAM) og grundvandsmodellen. Den tidslige variation i grundvandsdannelsen er simuleret med NAM ud fra tidsserier af nedbør, fordampning og temperatur. Denne grundvandsdannelse routes herefter via sekundære grundvandsforekomster til det primære grundvandsmagasin, hvis respons herpå beskrives af grundvandsmodellen.

Det primære formål med denne sammenkøring af overfladevands- grundvandsmodel har været at beskrive de relativt uforstyrrede (naturlige) observerede årstidsfluktuationer i grundvandets trykniveau i den centrale del af Susåens opland. Derimod er der ikke lagt sær-

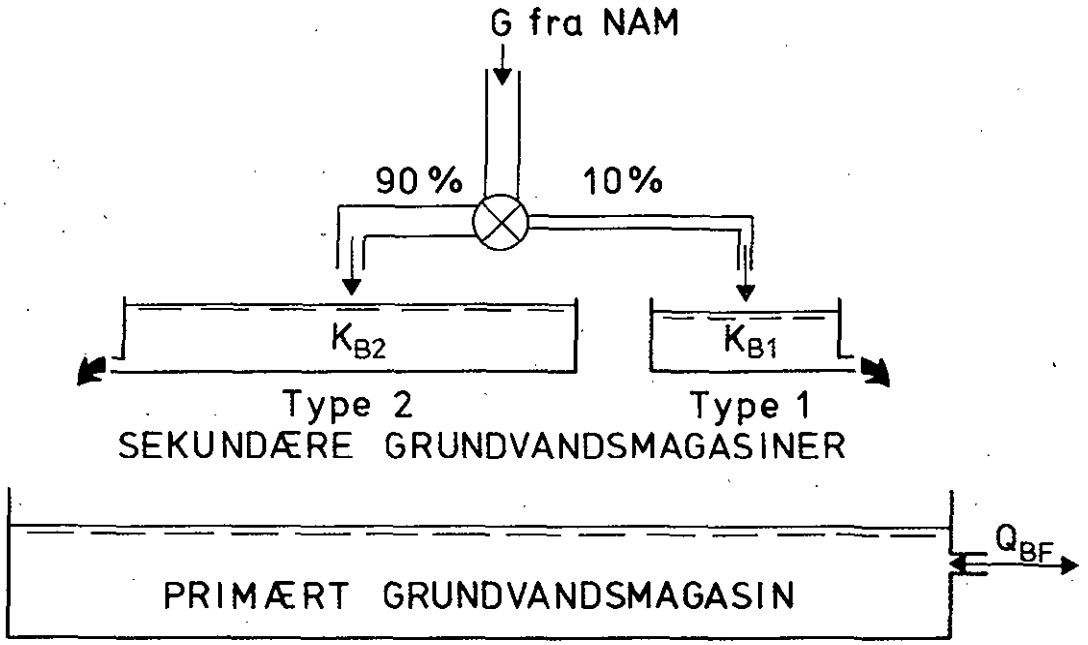
lig stor vægt på at beskrive forholdene i den nordlige del af modelområdet, hvor den betydelige vandindvinding inden for de sidste 12-13 år griber forstyrrende ind i årstidsfluktuationerne.

Både lækagen ved Regnemark og grundvandsindstrømningen over modelområdets rand antages at variere i takt med grundvandsdannelsen i NAM - sidstnævnte dog med en betydeligt mindre amplitude på grund af den udjævnende effekt fra vandets transport over længere afstande fra kalken til grønsandsaflejringerne.

NAM er herefter blevet benyttet til at simulere den tidslige distribuering af grundvandsdannelsen i nedsivningsområdet omkring Haslev, hvor der som tidligere nævnt må påregnes relativt store forekomster af smeltevandssand og sandet moræne. Den årstidsmæssige distribuering af grundvandsdannelsen bliver i NAM først og fremmest bestemt af parameteren C_{LG}. Eftersom nedsivningen foregår lokalt på sandede områder, må det forventes, at en C_{LG}-værdi på 0.0, som anvendes på sandede jorder i Jylland, jfr. tabel 2.3.1, giver en bedre tidslig beskrivelse af grundvandsdannelsen end en C_{LG}-værdi på 0.70, der anvendes som gennemsnitsparameter for Suså-områdets blanding af sand- og lerjorder. Med de øvrige modelparametre som angivet i tabel 2.4.1 for Vetterslev-oplandet er der herefter foretaget en simulering af den daglige grundvandsdannelse G i perioden 1950-75. Den således simulerede G, der varierer såvel inden for de enkelte år som fra år til år og i gennemsnit andrager 150 mm/år, vægtes herefter i de relevante polygoner med forholdet mellem den i tabel 1.5.6 angivne årlige nedsivning pr. polygon og de 150 mm/år. Nedsivningen inden for hver polygon bliver således i gennemsnit over en længere årrække som angivet i tabel 1.5.6, men der forekommer nu variationer såvel inden for hvert år som mellem fugtige og tørre år. Det bemærkes, at den således beregnede nedsivning i gennemsnit over længere tidsrum har samme størrelse som den i afsnit 2.4.2 angivne nedsivning $(1-C_{AREAL})\cdot BF$ til det primære grundvandsmagasin.

Nedsivningen G tænkes at foregå til de sekundære grundvandsmagasiner, hvorfra den med en vis forsinkelse når frem til det primære grundvandsmagasin. De sekundære grundvandsforekomster tænkes at bestå af flere fra hinanden adskilte sand- og grusforekomster i morænen, hvilket jfr. afsnit 3.1 må anses for en rimelig antagelse. Nogle af de sekundære forekomster tænkes at have direkte for-

bindelse til det primære grundvandsmagasin, mens der for størstedelens vedkommende findes semipermeable lag imellem de sekundære og det primære magasin. Routningen af G gennem de sekundære reservoirer er beskrevet som en routning gennem 2 parallelle lineære reservoirer med forskellige tidskonstanter som skitseret på figur 3.3.1.

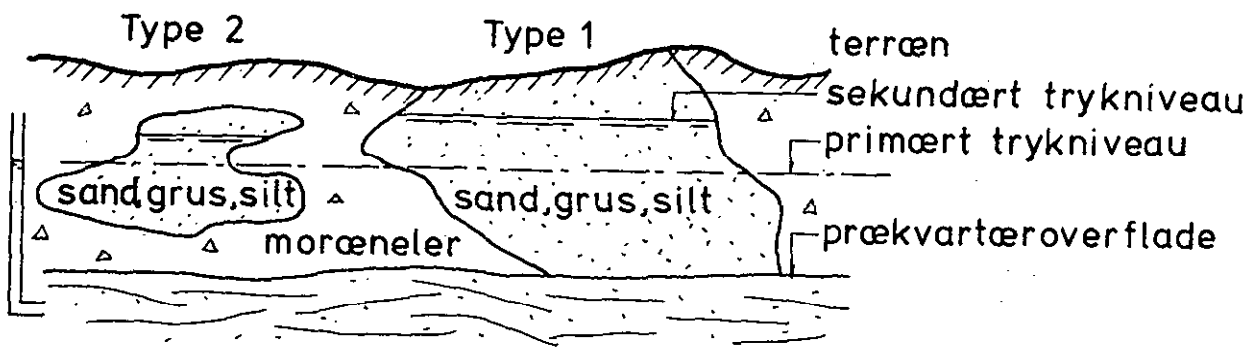


Figur 3.3.1 Routning af grundvandsdannelsen G.

Det bemærkes, at de sekundære magasiner, der opereres med her, i princippet har en anden funktion end det sekundære grundvandsmagasin i NAM, jfr. afsnit 2.4.2, hvorfra der sker en horisontal vandudstrømning til vandløbene. Begge typer sekundære grundvandsforekomster må formodes at forekomme, og vandafgivelsen fra disse til vandløb eller primært grundvandsmagasin styres af den lokale geologi, trykniveauforhold, vandløbenes nærhed m.v.

På figur 3.3.2 er vist et skematisk geologisk snit i de kvartære formationer med to forskellige typer sekundære reservoirer. I type 1 er det sekundære magasin i direkte kontakt med det primære, mens en morænelersbænk tænkes at danne et semipermeabelt lag mellem de to magasiner i type 2. Det kan vises, at routningen i de sekundære magasiner i begge tilfælde foregår som gennem et lineært reservoir, således at en situation som vist på figur 3.3.2 svarer til en routning gennem to parallelle lineære reservoirer som skitseret på figur 3.3.1. Det lineære reservoirs tidskonstant K_B kan i begge tilfælde vises at være lig den reciprokke lækage-

koefficient $\frac{m'}{P'}$. Den bedste beskrivelse af årstidsfluktuationerne i det primære trykniveau fandtes ved et benytte tidskonstanterne K_{B1} = 30 dage og K_{B2} = 5000 dage, hvilket f.eks. svarer til m_1' = 25 m og P_1' = 10^{-5} m/s i type 1 og m_2' = 5 m og P_2' = 10^{-8} m/s i type 2, jfr. figur 3.3.2.



Figur 3.3.2 Et skematisk geologisk snit omkring Haslev.

Som det endvidere fremgår af figur 3.3.1, antages grundvandsdannelsen for 90 procents vedkommende at ske gennem reservoirer af type 2, hvilket kan fortolkes således, at der kun i 10 procent af nedsivningsområdet ved Haslev, eller på 2 km^2, tænkes at forekomme sekundære magasiner af type 1. Når der benyttes tidskonstanter af de nævnte størrelser, svarer det til, at reservoirerne af type 1 "tørrer ud" om sommeren, hvor grundvandsdannelsen er lille eller nul, mens type 2-reservoirerne kun langsomt vil "udtørres" gennem en årrække med lille nedbør. Type 1-reservoirerne er med andre ord årsag til de observerede årstidsfluktuationer, idet variationerne i nedbøren på månedsbasis ikke vil udviskes ved routningen gennem disse. Den drift, der kan registreres i trykniveautidsserierne på figurerne 1.5.4-5 i tørre eller fugtige årrækker, kan henføres til grundvandsdannelse via type 2-reservoirerne. De tydeligste perioder med faldende tendens i trykniveauerne er i årene 1951-53 og 1955-57, hvor modellen på basis af små nedbørsmængder simulerer denne tendens udmærket. Det store udsving i det ekstremt tørre år 1959 er modellen ikke i stand til at simulere, men den stigende tendens i de 4 våde år 1965-68 genfindes tydeligt i de simulerede

resultater. I disse år er pejleresultaterne i den nordlige del af området dog forstyrret en del af den begyndende vandindvinding til Regnemarkværket.

Det skal bemærkes, at "udtørring" af sekundære reservoirer ikke i denne forbindelse nødvendigvis betyder en egentlig tømning af disse, blot at vandspejlet sænkes til samme kote som det primære grundvandsmagasins trykniveau og derfor ikke længere bidrager til den primære grundvandsdannelse. Denne mekanisme svarer ganske godt til de observerede fluktuationer i de sekundære vandspejl, idet der i de geotekniske undersøgelser ikke er registreret en tømning af sekundære reservoirer i sommermånederne, men kun fluktuationer i vandspejlet på op til nogle meter.

Den tidsmæssige variation i trykniveau giver anledning til en tidsmæssig variation i vandudvekslingen, Q_{BF}, mellem vandløb og grundvand. Ved anvendelse af den i afsnit 3.2.2 anvendte model for vandudvekslingen er Q_{BF} for perioden 1950-75 fundet at variere mellem 67 l/s og 90 l/s inden for den del af Suså-Vetterslev-oplandet, som ligger inden for grundvandsmodelområdet. En typisk variation over et år var for det samme område mellem 70 l/s og 80 l/s.

3.4. En fremtidig integreret overfladevands- grundvandsmodel

Det i afsnit 3.3 omtalte eksempel på en sammenkøring af overfladevands- og grundvandsmodel har vist, at man ved at udnytte information fra én model kan forbedre den anden model. Resultaterne af en sammenkøring af de to modeller har i denne undersøgelse været en forbedret grundvandsdel til overfladevandsmodellen (jfr. afsnit 2.4.2) samt en bedre kalibrering af grundvandsmodellen (jfr. afsnit 1.5.5.3).

Det må imidlertid slås fast, at der endnu mangler en del viden, før der kan opbygges en integreret model, som giver en samlet beskrivelse af vandstrømmene ved jordoverfladen, i den umættede zone samt i og mellem grundvandsmagasinerne. Det ville således være ønskeligt med en mere detaljeret viden om og en større forståelse af nedsivningsmekanismerne og strømningsforholdene i de sekundære grundvandsforekomster.

I forbindelse med forudsigelse af hvilke ændringer i afstrømningsforhold, nedsivningsforhold, lækage m.v., som forskellige indgreb

giver anledning til, vil én integreret overfladevands- *grundvands*-model være et væsentligt bedre redskab end to modeller i form af én overfladevandsmodel og én grundvandsmodel. Det må derfor anbefales, at der ved det fremtidige arbejde i området søges etableret en generel integreret overfladevands- grundvandsmodel.

4. GRUNDVANDSINDVINDING I SUSÅ-VENDEBÆK OMRÅDET

4.1. Indledning

Det generelle problem ved simulering af sænkninger ved en fremtidig grundvandsindvinding med en given kalibreret model består i at vurdere hvilke hydrologiske delprocesser, der påvirkes af den øgede vandindvinding, hvor meget disse processer påvirkes, samt hvilke muligheder de har for eventuelt at balancere de oppumpede vandmængder. Der er selvfølgelig den teoretiske mulighed, at det betragtede grundvandsreservoir er uden forbindelse med det hydrologiske kredsløb, og at en vandindvinding derfor blot vil betyde en gradvis tømning af magasinet. Er reservoiret frit, vil alene den vandmængde, der frigives inden for den opståede sænkningstragt, som regel andrage en betydelig størrelse i forhold til eventuelle andre bidrag, indtil en eventuel ligevægt opnås.

I det foreliggende tilfælde med udpræget artesiske forhold er det imidlertid af afgørende vigtighed at få bestemt randbetingelser og ændringer i det øvrige hydrologiske kredsløb, da sænkningstragten hurtigt vil brede sig i alle retninger fra kildepladserne. Visse af de hydrologiske processer, der vil berøres af en øget vandindvinding, kan direkte findes ved prøvepumpninger. Det drejer sig i første række om udbredt lækage, som er konstateret ved Regnemark. Mindre bidrag fra nedsivning af åvand og mindre lækageområder kan næppe påregnes registreret ved prøvepumpninger, men må konstateres ad anden vej.

I Suså-Vendebæk området er der således (jvf. kap. 1 og 3) følgende hydrologiske delprocesser, som kan tænkes påvirket af en øget vandindvinding:

1) lækagen i Regnemark-området
2) lækagen i Haslev-området
3) vandudvekslingen med Suså-systemet
4) vandudvekslingen med de omgivende grundvandsreservoirer.

ad 1) I afsnit 1.5.1.3 er omtalt de tydelige indikationer, der haves på lækage over et udbredt område. Endvidere er P'/m' som nævnt ret godt bestemt i hele området, og lækagen er medtaget i alle de udførte simuleringer med modellen.

ad 2) Her udviser de analyserede prøvepumpninger ikke tydelige tegn på lækage. Imidlertid synes flere ting i kalibreringsfaserne at pege på tilstedeværelsen af en sådan, omend den har mindre omfang end i Regnemark-området. Muligvis har ingen af prøvepumpningerne lavet tilstrækkelig store sænkninger omkring Haslev til at kunne igangsætte lækage af nævneværdigt omfang, eller også er den aktuelle lækagekoefficient meget lille.

ad 3) Som omtalt i kapitel 3 synes det ad flere veje godtgjort, at Susåen modtager et grundvandstilskud langs dele af vandløbet, hvor en opadrettet gradient er til stede. Ligeledes er det sandsynliggjort, at åvand siver ned til grundvandet langs det øvre løb inden for grundvandsmodellens rammer. Det er derfor nærliggende at antage, at vandudvekslingen mellem å og grundvand er styret af gradienten mellem grundvandets trykniveau og åvandspejl (afsnit 1.5.5.2 og 3.2.2).

ad 4) Prøvepumpningerne er her velegnede til at fastlægge beliggenheden af de impermeable dele af randen, mens det ikke er muligt at udlede noget om randbetingelserne langs de permeable dele af den valgte rand. Kalibreringsproceduren er i stand til at sige noget om den aktuelle størrelse af vandstrømmene over modelranden og deres variation hen over året; men hvorledes forholdene skal beskrives i tilfælde af betydelige sænkninger ved de permeable dele af modelranden kan ikke umiddelbart afgøres.

For overskuelighedens skyld er der i de nedenfor præsenterede programkørsler ikke taget hensyn til årstidsfluktuationer, som det iøvrigt heller ikke på fuldt tilfredsstillende måde er lykkedes at beskrive med modellerne.

4.2. Simulering af grundvandsindvinding

4.2.1. Konstant ind-/udstrømning over modelranden

I første omgang er det ved simulering af de fremtidige sænkninger antaget, at lækagen ved Haslev ikke kan forøges ud over de ved kalibreringen fundne størrelser, ud fra den betragtning at det ikke har været muligt at fastlægge nogen egentlig lækagekoefficient.

Lækagen andrager altså konstant de beløb, der er anført i tabel 1.5.6. Endvidere er det overalt langs modelranden antaget, at grundvandsstrømmene ikke ændres i forhold til situationen i august 1974, der fremgår af bilag 8.

Ved simuleringen er anvendt en oppumpning på 21 mill. m^3/år eller 0.668 m^3/s fordelt på kildepladserne således som anført i tabel 4.2.1.

Kildeplads	Polygon nr.	$Q \cdot 10^2$ (m^3/s)
Ørslev	10	7.96
	16	7.96
Aversi	22	9.55
	23	9.55
Hjælmsølille	33	9.54
	27	3.18
Mulstrup	30	3.18
	69	3.18
Tybjerglille	25	6.37
	36	6.37
Ialt		66.8

Tabel 4.2.1 Den fremtidige oppumpningsfordeling på de enkelte kildepladser.

Hvis en oppumpning af denne størrelse påbegyndes momentant under de angivne forudsætninger, vil sænkningsbilledet nå en stationær tilstand efter ca. 3 år, og slutsænkningerne fremgår af bilag 10. Da slutsænkningerne er proportionale med de oppumpede vandmængder, kan ligevægtssituationen ved oppumpning af en vilkårlig vandmængde (fordelt på kildepladserne efter samme forholdstal som angivet i tabel 4.2.1) let beregnes ud fra sænkningerne på bilag 10.

Af simuleringsresultatet fremgår det, at sænkningerne kun i ringe omfang udbreder sig nordpå som følge af lækagen samt de aftagende transmissiviteter. I den centrale del af området er sænkningerne relativt jævnt fordelt og strækker sig helt ud til den østlige begrænsning med størrelser på 12-13 meter. Mod vest aftrappes sænkningerne til 4-5 meter ved områdets begrænsning.

I dette tilfælde kommer de eneste bidrag til den øgede tilstrømning til kildepladserne altså fra lækagen ved Regnemark samt fra vandløbene. Bidragene fra disse fordeler sig således:

Regnemark-lækage	0.258 m^3/s
Vandløbene	0.410 m^3/s
Ialt	0.668 m^3/s

Konsekvenserne for Susåens vandføring ved tilløbet til Tystrup-Bavelse Sø ville altså generelt blive en formindskelse af vandføringen på 410 l/s over hele året. I denne forbindelse er det nok på sin plads at understrege, at modellen ikke tager hensyn til ændringer i vandudvekslingen mellem grundvandsmagasin og Ringsted Å på grund af manglende vandføringsdata til kalibrering af denne mekanisme.

Da kalibreringen af grundvandsmodellens vandudveksling med åerne primært er foretaget ud fra vandføringsmålingerne ved Vetterslev og opstrøms herfor, er det bedst bestemte mål for vandføringsændringerne som følge af vandindvindingen reduktionen i Susåens vandføring ved Vetterslev. På dette sted skulle vandføringen ifølge simuleringen blive reduceret med ca. 330 l/s over hele året. Sammenlignes denne størrelse med vandføringsmålingerne på figur 2.4.4, ses det at svare til en tørlægning af denne del af åsystemet i en periode på 3-4 måneder i somrene 1974 og 1975.

Fordi nedbør-afstrømningsmodellen og grundvandsmodellen ikke er integrerede i disse simuleringskørsler, forekommer den inkonsekvens, at grundvandsmodellen forudsætter en formindskelse af vandløbsafstrømningen større end de målte minimumsvandføringer. Over et år andrager de manglende vandmængder imidlertid så relativt små beløb, at en korrektion for dette forhold kun vil ændre simuleringsresultatet ubetydeligt. Endelig skal det senere ses, at usikkerheden i fastlæggelsen af randbetingelser medfører en betydelig usikkerhed på bestemmelse af belastningen af vandløbet.

4.2.2. Gradientafhængig ind-/udstrømning over modelranden

Med de samme ydelser fra kildepladserne er herefter foretaget en simulering af sænkningerne under forudsætning af, at trykniveauet i de omgivende grundvandsreservoirer holdes konstant, og ind-/udstrømningen over modelranden er proportional med den resulterende

gradient. Der regnes altså i princippet med, at de omgivende reservoirer er i stand til at afgive vilkårligt meget vand til modelområdet uden dog at blive påvirket af sænkninger. De øvrige forudsætninger er som i afsnit 4.2.1.

På bilag 11 er ligevægtssænkningerne afbildet. Disse opnås efter ca. 1½ års konstant indvinding. De maksimale sænkninger bliver nu kun omkring 9 meter, og det ses, at sænkningerne hurtigere aftager mod både øst og vest som følge af de ændrede randbetingelser. Regnemark-området er stadig relativt lidt påvirket af den påtænkte indvinding. De enkelte hydrologiske delprocessers bidrag til den øgede vandindvinding fordeler sig nu således:

Regnemark-lækage	0.152 m^3/s
Vandløbene	0.270 m^3/s
De omgivende grundvandsreservoirer	0.246 m^3/s
Ialt	0.668 m^3/s

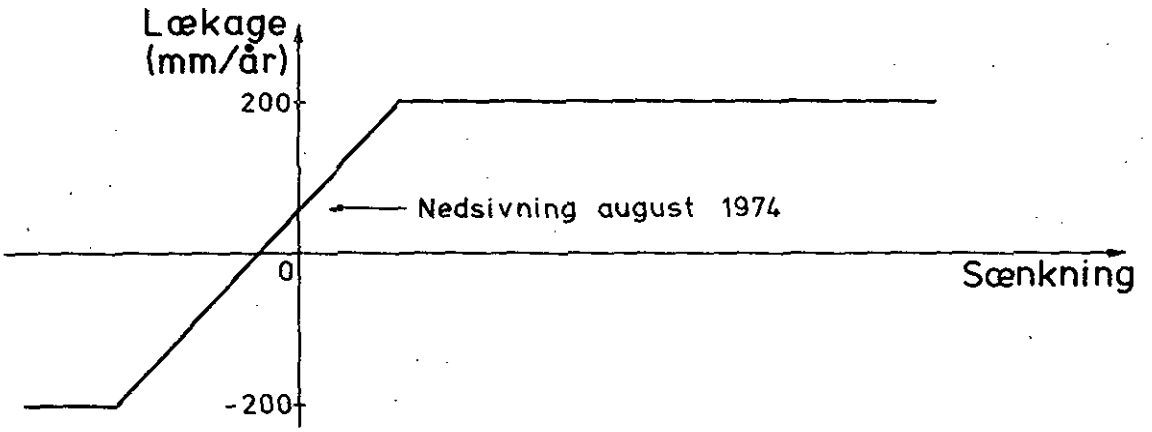
Der er naturligvis overalt tale om netto-bidrag, således at forstå, at f.eks. vandløbenes bidrag på 270 l/s ikke er ensbetydende med, at 270 l vand siver ned fra vandløb til grundvand. Bidraget fremkommer som en sum af øget nedsivning fra vandløb til grundvand (øvre løb) og en formindskelse af grundvandstilskuddet langs det nedre løb.

De ændrede randbetingelser ses at medføre en ikke ubetydelig ændret vurdering i retning af en formindskelse af skadevirkningerne på Suså-systemet, mens de omliggende grundvandsreservoirer belastes med et bidrag, der omtrent svarer til den netto-tilstrømning, som allerede er til stede i august 1974.

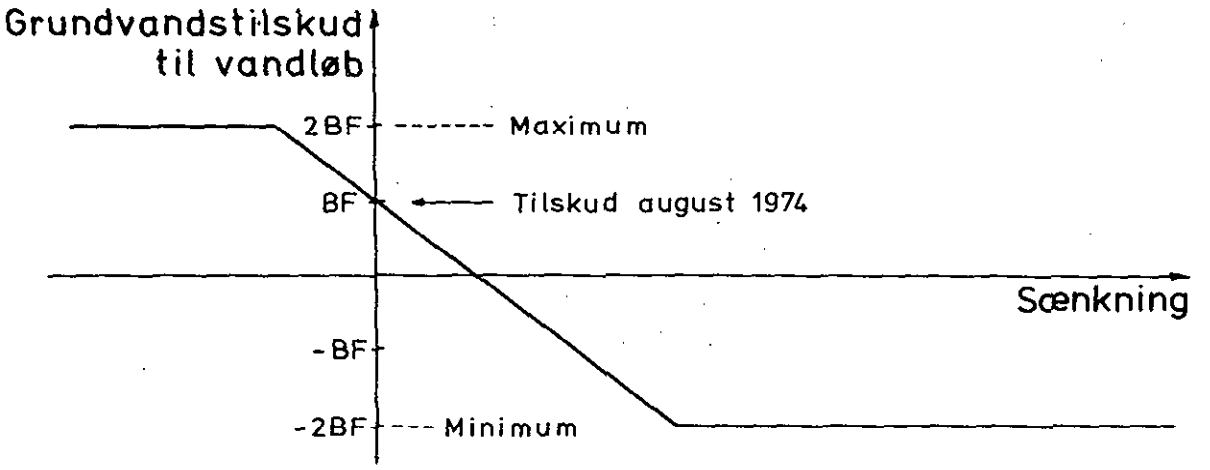
4.2.3. Øget lækage ved Haslev

Som en variant af sidstnævnte kørsel er det undersøgt, hvilken effekt, antagelse af en lækagekoefficient på $P'/m' = 0.5 \cdot 10^{-9}\ s^{-1}$ i Haslev-området (polygon 4, 5, 6, 11, 12 og 13, bilag 6 og 7) vil få på ligevægtssænkningerne. Da der til brug i kapitel 5 er behov for en kørsel med øvre grænser på lækagebidragene og vandløbenes bidrag, er endvidere forudsat, at den samlede lækage i hver polygon maksimalt kan andrage 200 mm om året, og at der i hver polygon højst kan induceres en ændring af vandudvekslingen til ± 2 gange den absolutte værdi af den oprindelige størrelse i august 1974.

Princippet i de to bidrags variation med sænkningerne fremgår af figur 4.2.1 og 4.2.2.



Figur 4.2.1 Lækagens variation med sænkningen.



Figur 4.2.2 Grundvandstilskuddets variation med sænkningen.

Disse ændrede forudsætninger fører til et sænkningsbillede, der kun på få punkter afviger fra bilag 11. I Haslev-området fås 2-3 meter mindre sænkninger, så sænkningskurverne lokalt afbøjes mod vest, og de maksimale sænkninger vokser til ca. 10 meter; derudover er kurvernes forløb stort set identiske. Årsagen er, at de valgte øvre grænser på grundvandstilskud og lækage kun få steder nås i denne simulering. Opdelingen af bidragene fra de enkelte delprocesser er i dette tilfælde følgende:

Regnemark-lækagen	0.177 m^3/s
Haslev-lækagen	0.078 m^3/s
Vandløbene	0.187 m^3/s
De omgivende grundvandsreservoirer	0.226 m^3/s
Ialt	0.668 m^3/s

Den væsentligste forskel mellem denne fordeling og fordelingen i afsnit 4.2.2 ses at være, at vandløbene umiddelbart synes aflastet med det lækage-bidrag, der hidrører fra Haslev-området. Imidlertid hentes lækage-bidraget inden for den øvre Susås opland, så selv om det direkte grundvandstilskud til åen ikke belastes så hårdt som i afsnit 4.2.2, vil vandløbene alligevel i den sidste ende unddrages stort set samme vandmængde på gennemsnitligt ca. 270 l/s (jfr. afsnit 4.3).

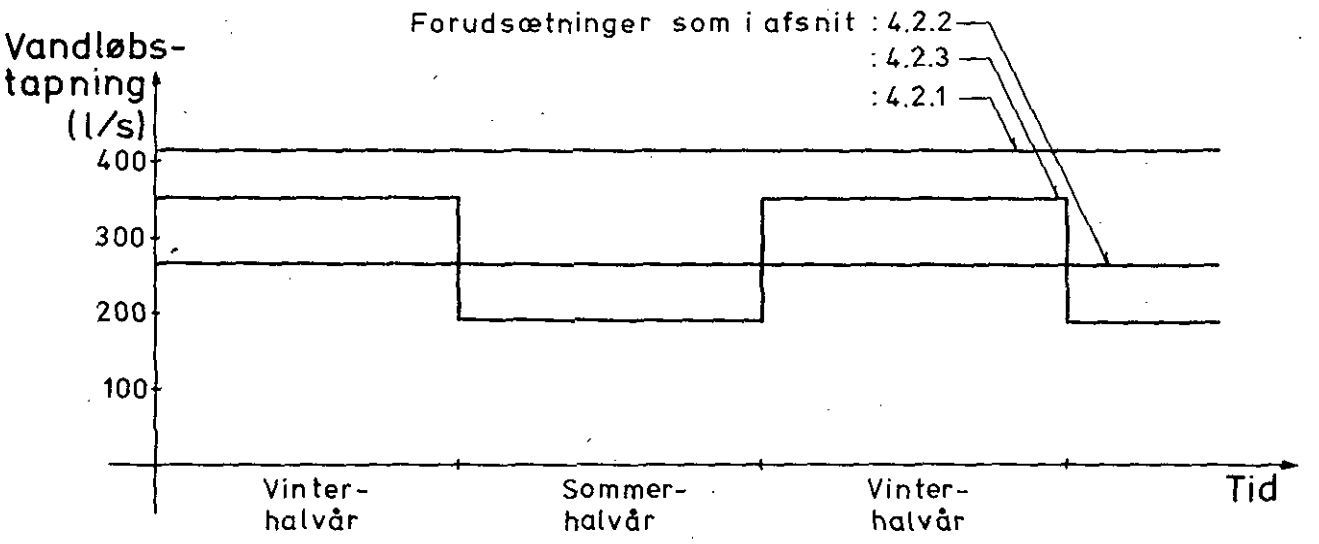
Selv under disse sidstnævnte ret optimistiske forudsætninger får den påtænkte indvinding som konsekvens, at vandføringen ved Vetterslev i sommerhalvåret formindskes med ca. 140 l/s, hvilket stort set svarer til en udtørring af åen i de tørreste perioder. Det skal her pointeres, at der kun haves vandføringsdata fra 2 år som sammenligningsgrundlag.

4.3. Vurdering af simuleringsresultater

Af de præsenterede kørsler ses det, at randbetingelserne langs den permeable del af modelranden har afgørende betydning for simuleringsresultatet. Det kan næppe umiddelbart siges, at den ene af de valgte betingelser er mere realistisk end den anden. Den i afsnit 4.2.1 valgte fremgangsmåde forudsætter jo reelt enten, at grundvandsstrømmen over randen helt er uafhængig af gradienten, eller at sænkningerne udbreder sig uhindret over modelranden. I afsnit 4.2.2 og 4.2.3 forudsættes til gengæld, at sænkningerne overhovedet ikke kan udbrede sig over randen, og at det omgivende magasin er i stand til at afgive i princippet ubegrænsede mængder vand til det betragtede område. Sandheden må søges et sted mellem disse to yderpunkter. Det er endvidere klart, at antagelserne er mest kritiske ved den østlige begrænsning, hvor indstrømningen fra øst gennem modellen styres.

Skal vurderingerne af de hydrologiske konsekvenser for Susåens vandføring ved indløbet til Tystrup-Bavelse Sø sammenlignes for de

tre kørsler, kan dette gøres grafisk som vist på figur 4.3.1.



Figur 4.3.1 Principiel fordeling af formindskelsen af Susåens vandføring hen over året.

For afsnit 4.2.1 og 4.2.2's vedkommende er illustrationen i figur 4.3.1 ligetil, da her er beregnet en gennemsnitlig påvirkning af grundvandstilskuddet fra det paleocæne reservoir. I afsnit 4.2.3 er der imidlertid gået ud fra, at lækagen ved Haslev forøges, og at de sekundære reservoirer afgiver samme vandmængde til det primære hele året. Dette påvirker imidlertid kun vandløbene i den periode, hvor de sekundære reservoirer yder tilskud (på figur 2.4.3 betegnet BF) til vandføringen. Ifølge afsnit 2.4.2 og specielt figur 2.4.3 ses dette typisk at dreje sig om vinterhalvåret, hvilket er en konsekvens af de sekundære reservoirers relativt lille tidskonstant på ca. 40 dage. Når der i den foretagne simulering derfor findes en gennemsnitlig forøgelse af lækagen på 78 l/s fordelt over hele året, og denne kun kan påvirke afstrømningen i vinterhalvåret, vil effekten naturligt skulle fordobles.

Selv om betragtningen er forenklet, må den tidslige variation af vandløbsbelastningen anses for principielt korrekt. En bedre beskrivelse af oppumpningens indvirkning på vandløbsafstrømningen vil kunne opnås ved sammenkobling af overfladevands- og grundvandsmodellen, hvorved den tidslige variation af vandløbsbelastningen vil kunne beskrives mere detaljeret. De her fundne gennemsnits-

størrelser for belastningen vil dog næppe ændres væsentligt på årsbasis ved en sammenkøring af modellerne.

Med hensyn til de valgte øvre grænser for belastningen af vandløb samt lækageområder kan anføres, at disse nærmest er at betragte som eksempler, der ikke direkte er fysisk begrundet. Det står imidlertid fast, at der må eksistere øvre grænser for de enkelte hydrologiske processers evne til at balancere oppumpningen.

Ud fra resultaterne må det konkluderes, at en indvinding på 21 mill. m^3/år fra de nye kildepladser i Suså-Vendebæk området vil medføre:

1) Sænkninger omkring kildepladserne på 8-12 meter.
2) En formindskelse af Susåens vandføring nedstrøms for Broksø, så vandløbet i sommermånederne kan udtørre.
3) Relativt lille påvirkning af området omkring kildepladserne til det eksisterende Regnemarkværk. Den her inducerede lækage vil efter alt at dømme andrage 5-8 mill. m^3 pr. år primært hentet fra et område syd for Ringsted.
4) Sandsynligvis vil også oplande til tilgrænsende vandløbssystemer blive påvirket af indvindingen. Det drejer sig her i første række om Køge Å og Tryggevælde Å's oplande øst for modelbegrænsningen. Simuleringerne antyder, at påvirkningerne kan blive på op til 5-6 mill. m^3 på årsbasis.

5. GRUNDVANDSMAGASINETS REAKTION PÅ KUNSTIG INFILTRATION AF OVERFLADEVAND

5.1. Indledning

I nærværende kapitel er vurderet en udnyttelse af kunstig infiltration af overfladevand i to sammenhænge, dels som et forsøg på at afhjælpe nogle af de uønskede effekter, en indvinding af 21 mill. m^3/år ifølge kapitel 4 må formodes at afstedkomme, dels i forbindelse med mulighederne for en eventuel større indvinding end de 21 mill. m^3 årligt. Ved kunstig infiltration forstås i denne sammenhæng nedpumpning af vand til det primære grundvandsmagasin gennem boringer. Grundlaget for disse betragtninger er det faktum, at der i vintermånederne er anselige mængder overfladevand til rådighed ved f.eks. Susåens udløb fra Tystrup-Bavelse Sø. Problemet ligger blot i at få opmagasineret disse vandmængder på en sådan måde, at en kontinuert vandindvinding (overflade- eller grundvand) bliver mulig. Mulighederne for at foretage denne opmagasinering i overfladem agasiner er behandlet i kapitel 7, ligesom konsekvenserne for vandløbene ved en indvinding af overfladevand til kunstig infiltration er søgt illustreret i samme kapitel.

Hvis man udelukkende betragter de uønskede effekter, en vandindvinding i Suså-Vendebæk-området vil få på Susåens vandføring, er det mest nærliggende at afhjælpe dette forhold ved en direkte udledning enten af oppumpet grundvand eller af oplagret overfladevand fra et passende overfladereservoir. Ifølge simuleringsresultaterne i det foregående kapitel er det nok realistisk at forestille sig udledning af mindst 150-200 l/s i 3-4 måneder om året, hvilket i alt vil beløbe sig til 1-2 mill. m^3 på årsbasis. Udtørringen af områdets øvrige vådområder (moser, enge, småsøer o.l.) afhjælpes ikke ved denne fremgangsmåde, hvorfor det ville være ønskeligt generelt at kunne formindske de trykniveausænkninger, en indvinding af 21 mill. m^3 må forudses at blive årsag til. I afsnit 5.2 er denne mulighed vurderet.

Det bør understreges, at eventuelle vandkemiske, hygiejniske, biologiske og forureningsmæssige problemer iøvrigt samt tekniske vanskeligheder ved den kunstige infiltration og vandrensning her er ladet ude af betragtning, idet der udelukkende behandles de grundvandshydrologiske aspekter af den kunstige infiltration.

5.2 Mulighederne for formindskelse af uønskede effekter ved kunstig infiltration

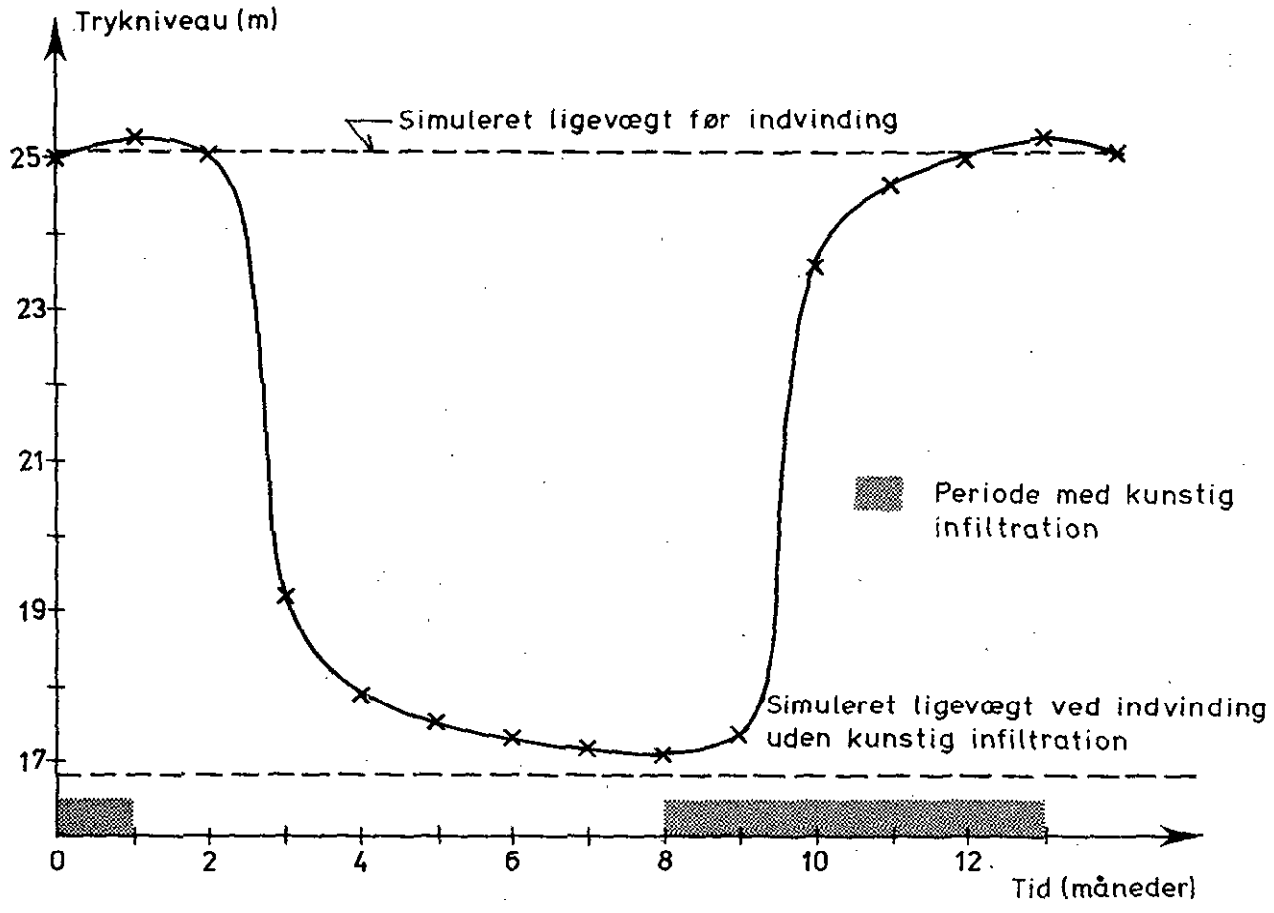
Som beskrevet i kapitel 4 vil indvinding af 21 mill. m^3 grundvand årligt fra de potentielle kildepladser efter alt at dømme betyde en sænkning af trykniveauet som illustreret på bilag 10 eller 11. Ved at anvende denne sænkningstragt som magasin for en del af den store overfladeafstrømning i vintermånederne kunne man forestille sig at reducere de uønskede effekter på omgivelserne.

Imidlertid medfører reservoirets artesiske egenskaber, at magasineringsevnen i sænkningstragten, bilag 10 og 11, er meget ringe. Skønsmæssigt kan den anslås til ½-1 mill. m^3. Man kan derfor retablere det nuværende trykniveau ved i en periode om vinteren at nedpumpe en vandmængde, der stort set blot modsvarer den i samme periode oppumpede vandmængde. Omtrent samme effekt kunne opnås ved at standse grundvandsindvindingen om vinteren.

Her er simuleret en situation under forudsætninger, der svarer til de i afsnit 4.2.2 gjorte. Der regnes fortsat med en indvinding af 21 mill. m^3/år, og i 5 af årets måneder infiltreres i alt kunstigt ca. 8 mill. m^3 i polygon 13, 24, 25 og 37 (området syd for Tybjerglille). Det ses, at disse nye kildepladser til nedpumpning er tænkt placeret i et område, hvor sænkningen ifølge bilag 10 og 11 kan forventes at blive størst, og hvor T- og S-værdierne er rimeligt store. Afstanden til Susåens nedre løb eller Tystrup-Bavelse Sø er desuden minimal. Placeringen af nedpumpningsstederne er i øvrigt ikke afgørende for de følgende betragtninger.

Idet polygon 26 kan betragtes som repræsentativ for hele det centrale indvindingsområde, fremgår det af figur 5.2.1, at få måneder efter ophøret af den kunstige infiltration vil sænkningerne være praktisk talt lige så store som de ligevægtssænkninger, der er præsenteret i kapitel 4. Dette skyldes reservoirets lille magasintal. Den uønskede formindskelse af vandføringen i Susåen i den kritiske sommerperiode er kun reduceret med ca. 10 l/s i de tre mest udsatte måneder, eller knap 5% af det i afsnit 4.2.2 fundne bidrag. Ved kunstig infiltration af endnu større vandmængder ændres disse forhold ikke nævneværdigt. Den foreslåede fremgangsmåde kan altså ikke forbedre forholdene i sommerhalvåret væsentligt, selv om den gennemsnitlige belastning af åløb og lækageom-

råder kan nedbringes betydeligt som følge af, at påvirkningerne kan elimineres i nogle af vintermånederne.



Figur 5.2.1 Sænkningsforløb i polygon 26 ved simulering af indvinding på 21 mill. m^3 med kunstig infiltration på 8 mill. m^3 årligt.

5.3 Mulighederne for forøgelse af grundvandsindvindingen ved kunstig infiltration

5.3.1 Problemstilling

Af afsnit 5.2 fremgår det, at den sænkningstragt, der opstår efter længere tids indvinding af 21 mill. m^3/år ikke rummer tilstrækkeligt volumen til at kunne udgøre et egentligt reguleringsmagasin, hvilket skyldes de artesiske forhold. En forøget vandindvinding kan dog ændre forholdene noget, hvis det primære trykniveau sænkes under prækvartæroverfladen. Reservoiret ændrer så karakter fra artesisk til frit, hvilket betyder, at magasintallet vil blive et par dekader større, og magasineringsevnen i reservoiret forøges dermed betydeligt.

Hvis derfor de uheldige effekter, en indvinding på 21 mill. m^3 har, findes acceptable, kan det efter alt at dømme lade sig gøre at indvinde endnu større vandmængder fra grundvandsmagasinet, når der suppleres med nedpumpning af overfladevand.

Dette kan efterprøves med grundvandsmodellen, ligesom denne vil kunne beregne de grundvandshydrologiske forandringer, et sådant indgreb i de naturlige forhold vil medføre.

5.3.2 Forudsætninger

Med henblik på at foretage en vurdering af effektiviteten af nedpumpningen må forudsætningerne ved en simulering konkretiseres. Eftersom der må påregnes ret store variationer i trykniveauet ved en kunstig infiltration (jvf. figur 5.2.1), vil det næppe være realistisk at anvende en lineær ekstrapolation af den vandudveksling, grundvandsmagasinet har med omgivelserne, før indvindingen startes. Derfor er anvendt de i afsnit 4.2.3 beskrevne forudsætninger med øvre og nedre grænser for vandudveksling med åløb og lækagegivende magasiner. Der er dog ikke specificeret en nedre negativ grænse for lækagens størrelse, idet der er regnet med, at det primære reservoir kan afgive ubegrænsede mængder vand til de sekundære i situationer med meget højt trykniveau som følge af nedpumpning.

Til beskrivelse af forhold med store sænkninger, hvor reservoiret må påregnes at blive frit, er skønnet $S = 10^{-2}$. Prækvartæroverfladen må også indføres i modellen, hvilket ret enkelt lader sig gøre ud fra basisdatakortet på bilag 1 og de geologiske snit i [3].

Der tænkes som nævnt placeret boringer til nedpumpning af overfladevand i polygonerne 13, 24, 25 og 37, og kapaciteterne tænkes fordelt på disse kildepladser efter forholdene 1:2:2:1.

De foreliggende vandføringsdata lader formode, at det de fleste år vil være muligt at indvinde op til 2-3 m^3 vand pr. sekund fra Suså-systemet omkring Tystrup-Bavelse Sø i 5 af årets måneder uden at tørlægge Susåens nedre løb (herom mere i kapitel 7). Hvorfra vandet hentes, er i disse betragtninger underordnet, og der er i det følgende blot forudsat, at der i løbet af 5 vintermåneder i alt kan disponeres over 30 mill. m^3 vand til kunstig infiltration.

For at kunne vurdere, hvor meget indvindingsmulighederne fra de etablerede kildepladser forbedres ved en given nedpumpning, må defineres en referencetilstand, hvor påvirkningen af de forskellige led i det hydrologiske kredsløb kan regnes konstant. Da der er sat øvre grænser på bidrag fra lækage og nedsivning fra vandløb, er som kriterium valgt, at det gennemsnitlige bidrag fra de omgivende grundvandsreservoirer (hovedsagelig kalkreservoiret mod øst) skal svare til det bidrag, der fås i den stationære sluttilstand, når der indvindes 21 mill. m^3/år uden kunstig infiltration. Ifølge afsnit 4.2.3 svarer det til, at man under de her anvendte forudsætninger er villig til at acceptere, at der induceres en underjordisk tilstrømning på 226 l/s i gennemsnit over året, eller at 7 mill. m^3 af den indvundne vandmængde hidrører fra omliggende grundvandsmagasiner.

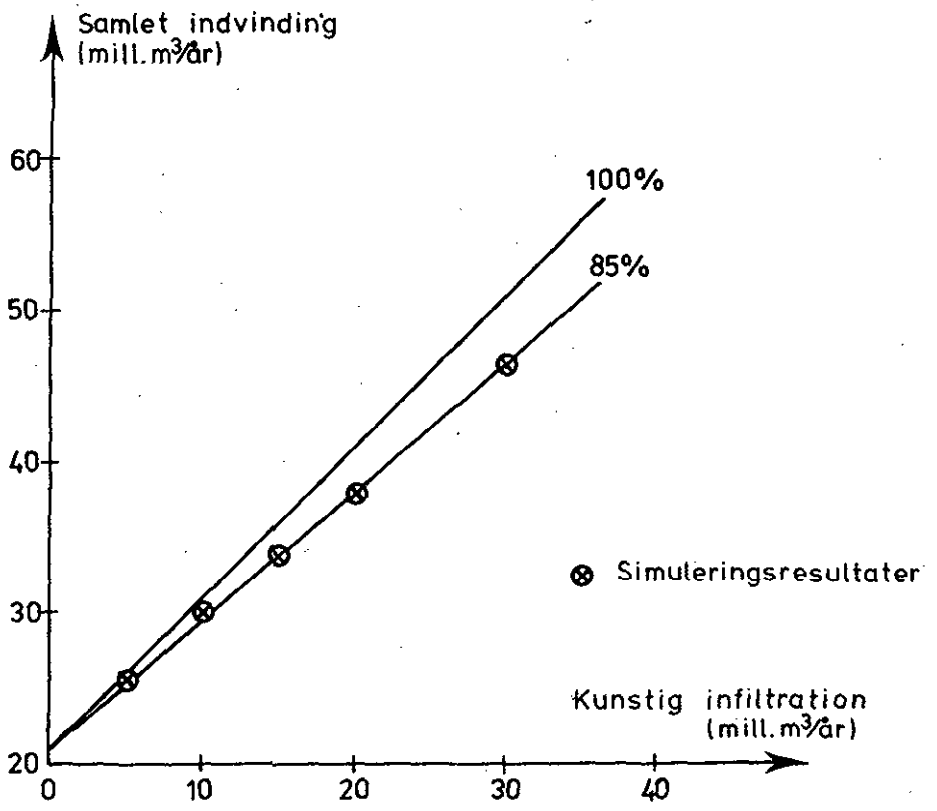
5.3.3 Simuleringskørsler

Der er foretaget simuleringer med kunstig infiltration på op til 30 mill. m^3/år (2.3 m^3/s i 5 måneder), og man kunne derfor i bedste fald forvente at være i stand til at indvinde 21 + 30 = 51 mill. m^3 årligt med samme gennemsnitlige skadevirkning på de omgivende grundvandsreservoirer. Simuleringerne viser imidlertid, at nyttevirkningen af en kunstig infiltration af denne størrelsesorden er ca. 85%, så der kun kan indvindes i alt ca. 47 mill. m^3 årligt.

For forskellige størrelser af den kunstige infiltration er på figur 5.3.1 illustreret nyttevirkningen eller effektiviteten. Det er interessant at bemærke, at tabet, d.v.s. differencen mellem den ned- og den oppumpede vandmængde + 21 mill. m^3/år, i ingen af de undersøgte tilfælde overstiger ca. 15% af den nedpumpede vandmængde.

Tabet vil hovedsageligt finde sted i form af en øget vandløbsafstrømning fremkaldt enten ved en direkte opsivning fra det primære grundvandsmagasin (jfr. tabel 5.3.1) eller ved en indirekte udsivning via de sekundære grundvandsforekomster.

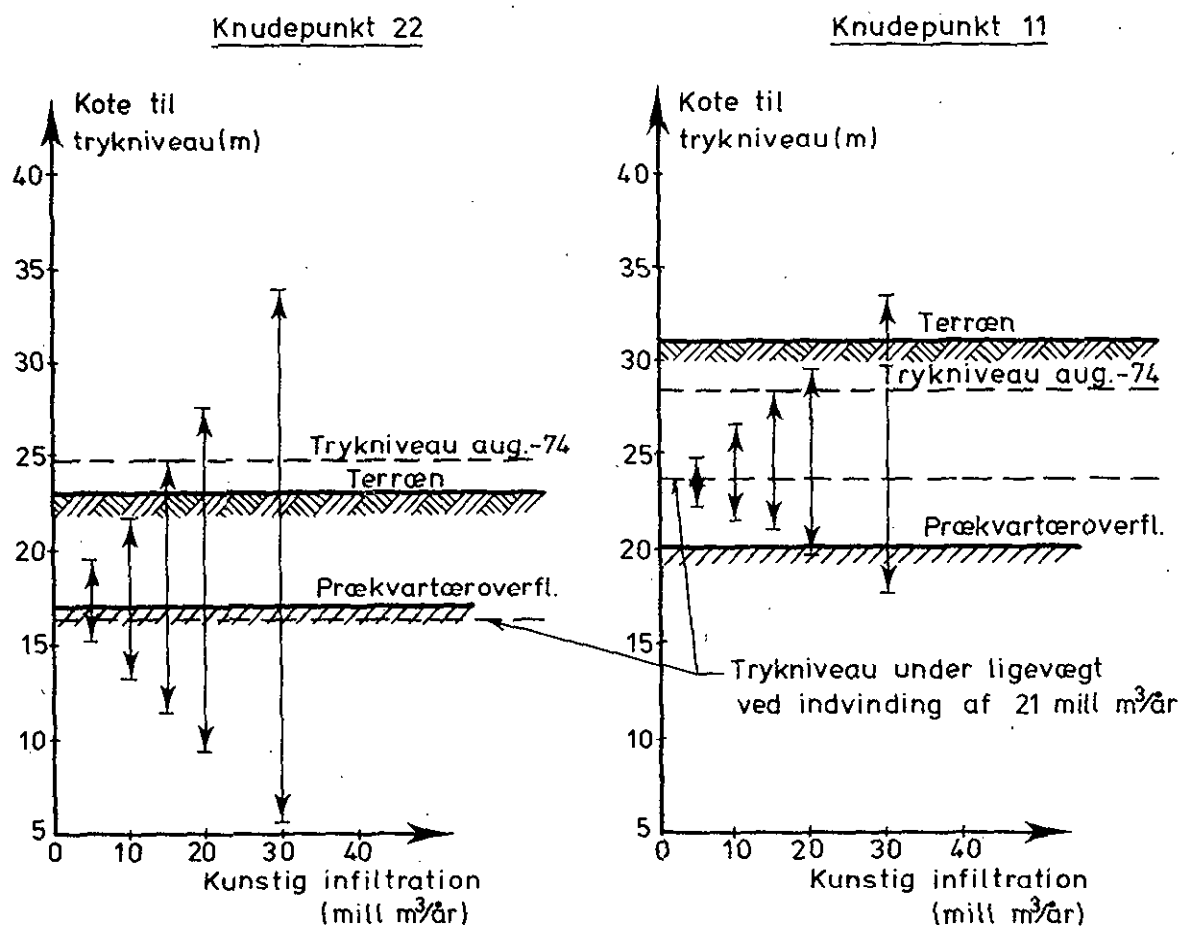
De ekstra vandmængder, der i vinterhalvåret tilgår vandløbene som følge af trykniveaustigningen, indgår til dels i et lukket kredsløb, idet de genindvindes længere nedstrøms i Suså-systemet.



Figur 5.3.1 Nyttevirkning af kunstig infiltration.

De fluktuationer, den periodevise nedpumpning af overfladevand afstedkommer, er imidlertid ganske betydelige, og på figur 5.3.2 er disse variationer vist. Heraf ses det, at variationerne ikke fordeler sig helt symmetrisk omkring ligevægtssænkningerne fra kapitel 4, hvilket skyldes, at en del af reservoiret bliver frit og dermed dæmper afsænkningerne. Bedømt ud fra de foretagne simuleringer synes denne dæmpning at sætte en nedre grænse for sænkningernes størrelse, omend de største sænkninger ligger betydeligt under ligevægtssænkningerne ved indvinding af 21 mill. m^3 årligt. Den arealmæssige fordeling af trykniveauvariationerne fremgår af bilag 12 for tilfældet med 20 mill. m^3 kunstig infiltration årligt. De overordentlig store amplituder omkring polygon 37 skyldes den omstændighed, at nedpumpningsstederne er lagt tæt op ad den impermeable rand mod syd, og de maksimale udsving kan nedbringes ved at placere nedpumpningsboringerne mere centralt i området. På bilag 12 er endvidere vist det trykniveau, der forekommer umiddelbart før nedpumpningens start, og som stort set svarer til det mindste forekommende trykniveau, selv om minimum ikke indtræffer

samtidigt i alle boringer. Trykniveauet kan sammenlignes med de nuværende forhold på bilag 2.



Figur 5.3.2 Trykniveauvariationer i knudepunkterne 22 og 11 ved forskellige størrelser af den kunstige infiltration (med samtidig forøget grundvandsindvinding).

Af tabel 5.3.1 fremgår det, hvilke konsekvenser de forskellige undersøgte kombinationer af op-/nedpumpning får for Susåens vandføring. Den angivne effekt på vandløbene i kolonnen uden kunstig infiltration stammer fra afsnit 4.2.3.

Som det kunne forventes, medfører en øget indvinding og kunstig infiltration større formindskelse af Susåens vandføring i sommerperioden som følge af trykniveauvariationerne (figur 5.3.2 og 5.2.1). Det voksende absolutte "tab" ved op-/nedpumpningsprocessen går dog som nævnt bl.a. til nedbringelse af den gennemsnitlige påvirkning af vandløbsafstrømningen, hvorfor denne er faldende med voksende op-/nedpumpning.

Op-/nedpumpning (mill. m^3/år)	21/0	25/5	30/10	34/15	38/20	47/30
Gennemsnitlig påvirkning af afstrømningen (l/s)	187	179	175	152	136	123
Maksimal påvirkning af afstrømningen (l/s)	187	209	242	266	287	330

Tabel 5.3.1 Konsekvenserne for Susåens vandføring af en kunstig infiltration og en øget vandindvinding.

5.4 Vurdering af resultater

Samlet for resultaterne i afsnit 5.2 og 5.3 kan konkluderes, at den undersøgte procedure for nedpumpning af overfladevand i grundvandsmagasinet i vintermånederne ikke er i stand til at forbedre forholdene væsentligt for åløbene og lækageområderne i den periode om sommeren, hvor disse vil belastes hårdest af en grundvandsindvinding. Derimod kan proceduren anvendes til aflastning af lækageområder og vandløb i gennemsnit over flere år. Dette kan få afgørende betydning for de sekundære grundvandsmagasiner, idet man kan frygte, at disse ved gennemførelse af en større grundvandsindvinding langsomt vil udtørres, dersom der ikke på de berørte nedsivningsområder kan opretholdes en naturlig årlig nedsivning svarende til den forudsatte på maksimalt 200 mm/år. De anvendte lækagekoefficienter vil dermed vise sig at være for optimistiske, da en del af disse kun er bestemt ved prøvepumpninger af begrænset varighed. En kunstig infiltration af overfladevand er derfor muligvis anvendelig til at afbøde uønskede effekter af en grundvandsindvinding på længere sigt.

Den i afsnit 5.3 undersøgte mulighed for at anvende den øgede magasineringsevne i et frit grundvandsreservoir til udnyttelse af overfladevand i vintermånederne viser sig at have to uheldige bivirkninger. For det første kræver en udnyttelse af de frie forhold så store trykniveauvariationer (se figur 5.3.2), at det vil være forbundet med store vanskeligheder at foretage den kunstige infiltration, og for det andet viser tallene i tabel 5.3.1, at

vandløbene i området i sommerperioden vil miste betydelige vandmængder. Denne sidstnævnte effekt kan man naturligvis tænke sig at begrænse ved i sommermånederne at foretage en udpumpning direkte i vandløbene af en del af det indvundne grundvand.

Set ud fra et grundvandshydrologisk synspunkt vil der således være betydelige problemer forbundet med at forøge vandindvindingsmulighederne ved nedpumpning af overfladevand i grundvandsmagasinet; om denne løsning er anvendelig i praksis og bedre end andre kan først afgøres, når de hydrologiske konsekvenser er vurderet i sammenhæng med en økonomisk analyse af et anlæg bestående af både op- og nedpumpningsinstallationer.

6. HARALDSTED-GYRSTINGE SØOMRÅDET

6.1. Indledning

En af delopgaverne i nærværende undersøgelse består i opstilling af en stokastisk model for indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø (jfr. kapitel 7). Det er i den forbindelse nødvendigt at frembringe en vandføringsserie for Ringsted Å med hensyntagen til de indgreb, der har fundet sted i det hydrologiske kredsløb inden for Ringsted Å's afstrømningsområde i form af overfladevands- såvel som af grundvandsindvinding.

Et væsentligt problem i tilknytning hertil er en beregning af, hvilken konsekvens grundvandsindvindingen til Regnemark har for indstrømningen til Haraldsted Sø. Københavns Vandforsyning (KV) har i en redegørelse [13] fra 1965 skønnet, at effekten ville bestå i en reduktion af størrelsen 2.4 mill. m^3/år. I forbindelse med nærværende undersøgelse er emnet behandlet i afsnittene 6.2 - 6.6.

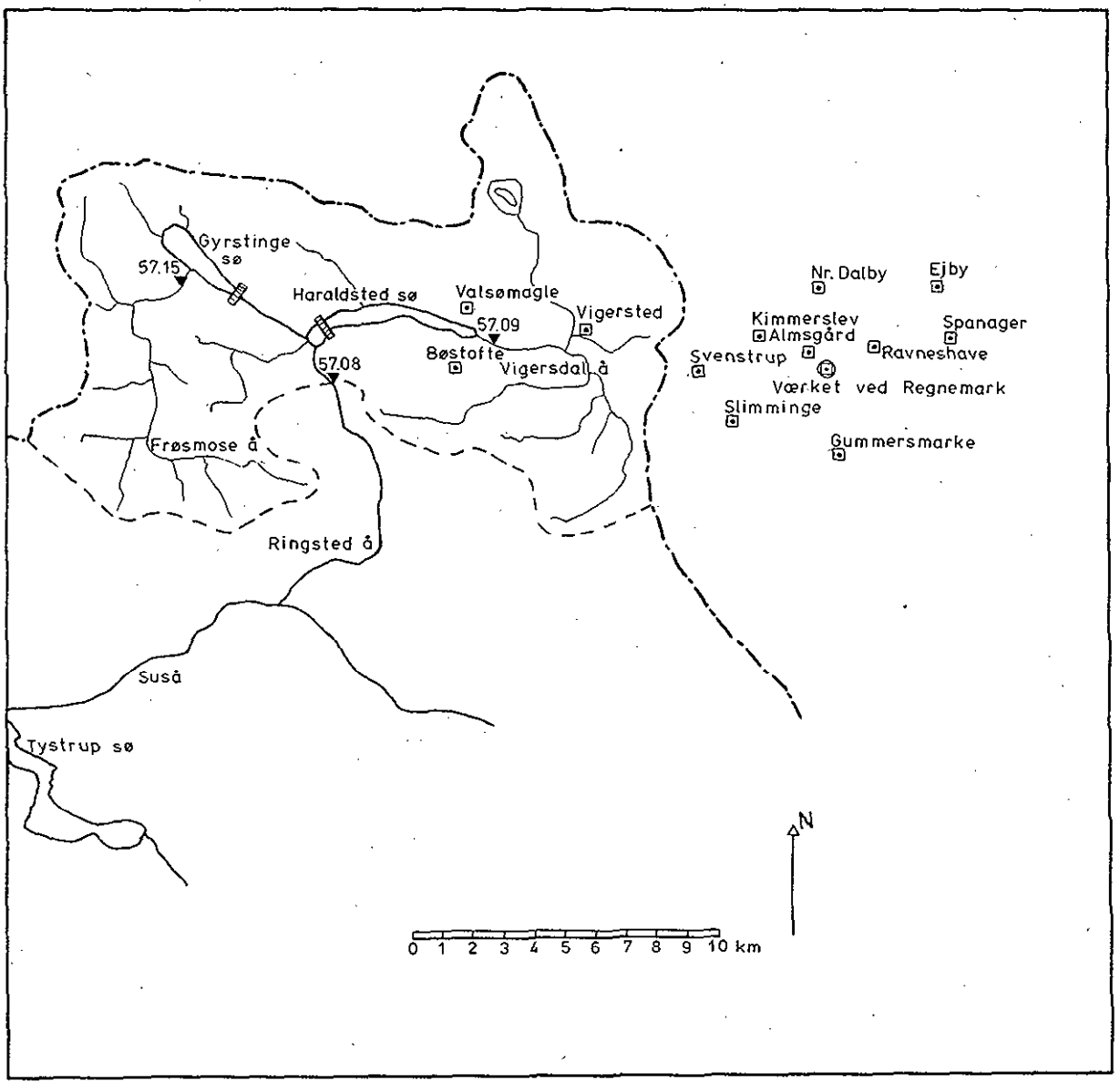
Et andet væsentligt aspekt er beregninger over, hvilken indflydelse reguleringen af vandmængderne i Haraldsted-Gyrstinge Sø samt vandindvindingen herfra får på såvel kote-forhold i søerne som udstrømning til Ringsted Å. Dette er behandlet i afsnit 6.7.

Hovedformålet med dette kapitel er at eksemplificere, hvordan man ved hjælp af matematiske modeller kan inddrage alt relevant hydrologisk datamateriale i en undersøgelse og således forbedre det hydrologiske beslutningsgrundlag. I dette eksempel er der således i vid udstrækning benyttet nedbørs-, temperatur- og fordampningsdata, som man uden modelbetragtninger kun ville kunne udnytte i mere begrænset omfang.

6.2. Hydrologisk beskrivelse

6.2.1. Haraldsted-Gyrstinge Sø-systemet

Haraldsted og Gyrstinge Søer er beliggende nord for Ringsted i Susåens opland. De har begge afløb til Ringsted Å, der er det største enkeltvandløb, der løber ind i Susåen. Søernes placering er vist på figur 6.2.1.

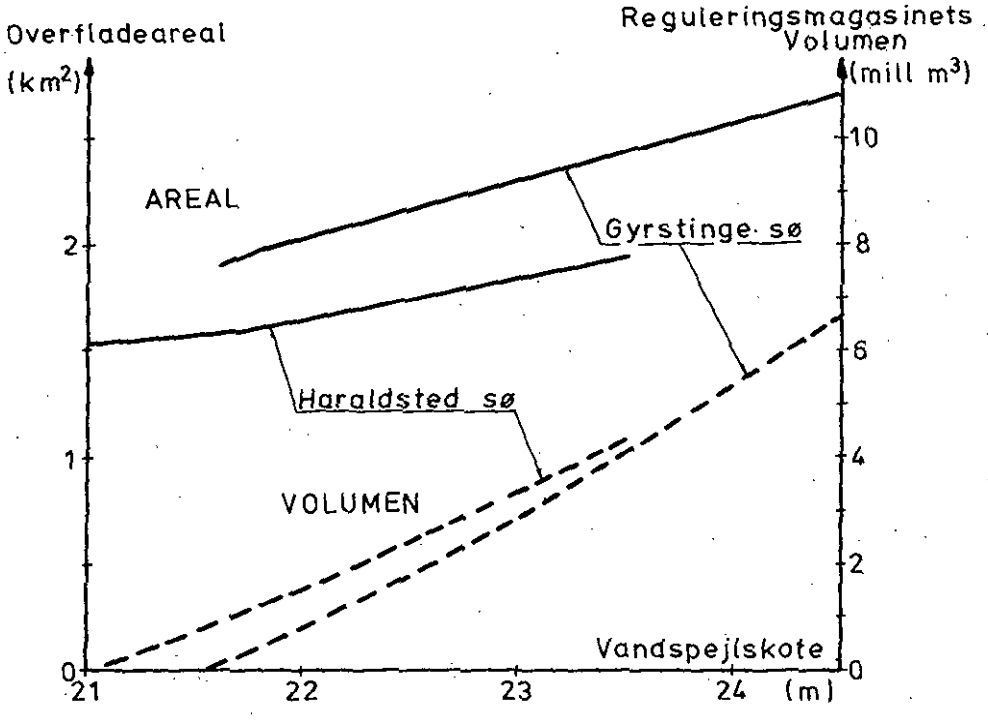


Dæmning
Topografiske oplandsgrænser
Vandføringsmålestation
Kildeplads
Regnemark Vandværk

Figur 6.2.1 Placeringen af Haraldsted og Gyrstinge Søer i Susåens opland.

Afstrømningsoplandet (excl. søarealet) er for Haraldsted Sø 105 km^2. Hovedtilløbet er Vigersdal Å med et opland på 72 km^2. Tilsvarende er afstrømningsoplandet for Gyrstinge Sø på 60 km^2, hvoraf hovedtilløbet Frøsmose Å udgør 44 km^2.

Københavns Vandforsyning (KV) har ifølge en landvæsenskommissionskendelse af 4.8.1966 for Københavns Vandforsynings Regnemarkværk ret til at anvende de to søer som reservoirer i forbindelse med overfladevandsindvinding fra søerne. Indvindingsretten beløber sig til maksimalt 15 mill. m^3/år under overholdelse af såvel minimums- og maksimumskotekriterier for de to søers vandspejl som et afstrømningskriterium for udledningen til Ringsted Å. Vandspejlet i Haraldsted Sø må variere mellem koterne 21.00 og 23.50 og tilsvarende i Gyrstinge Sø mellem 21.60 og 24.50. Afstrømningskriteriet er, at der skal afledes mindst 170 l/s fra de to søer til Ringsted Å. Sammenhængen mellem vandspejlskote, overfladeareal og magasinvolumen er vist på figur 6.2.2. Reguleringsmagasinets totale volumen ses at være 11 mill. m^3.



Figur 6.2.2 Kote-areal-volumen sammenhæng ved Haraldsted og Gyrstinge Søer.

For at kunne anvende de to søer som reguleringsmagasiner i forbindelse med vandindvinding er der som skitseret på figur 6.2.1 bygget en dæmning ved hver sø, hvorved vandstanden i søerne kan regu-

leres. Vandaftapningen foregår udelukkende fra Haraldsted Sø, hvorfra det pumpes til et overfladevandsbehandlingsanlæg ved Regnemark. Mellem Haraldsted og Gyrstinge Søer er der anlagt ledning og pumpestation således, at der i begge retninger kan pumpes maksimalt 390 l/s.

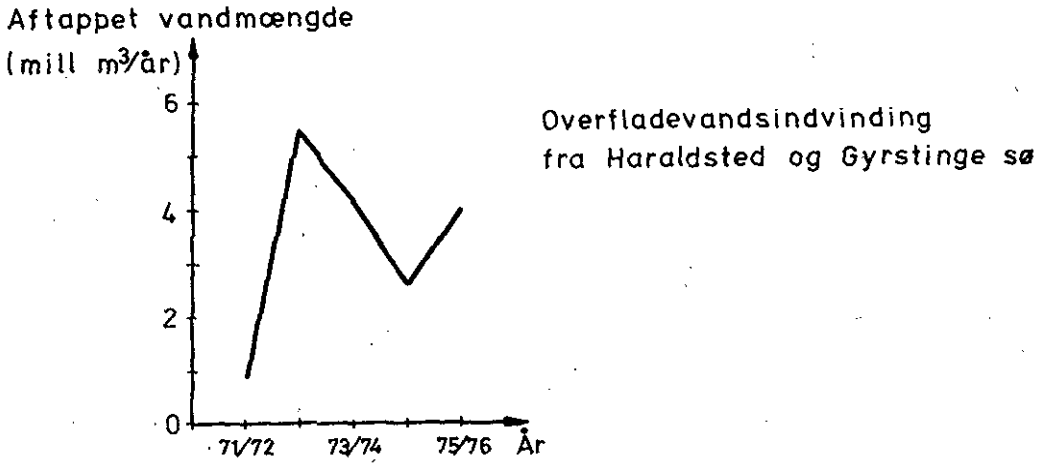
De udstrømmende vandmængder fra Gyrstinge og Haraldsted Søer løber sammen i Lille Haraldsted Sø, som er beliggende umiddelbart vest for dæmningen til Haraldsted Sø. Herfra løber vandet ud i Ringsted Å. Afstrømningsoplandet ved vandføringsmålestationen 57.08 Ringsted Å/Ll. Svenstrup er på 195 km^2.

Overfladevandsindvindingsretten på 15 mill. m^3/år er indtil videre ikke blevet fuldt udnyttet. På figur 6.2.3 er vist de årligt aftappede vandmængder siden indvindingens start i 1971/72.

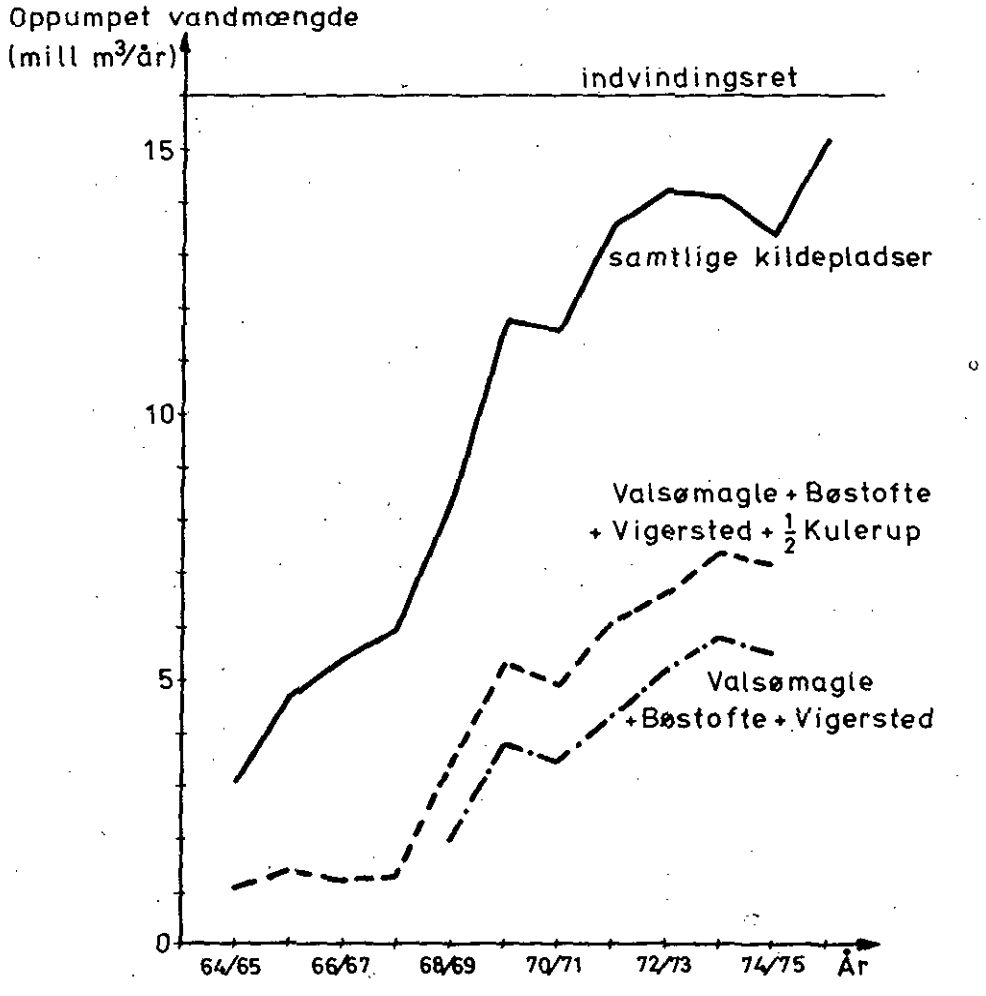
6.2.2. Grundvandsindvinding til Regnemark

Regnemark vandværk, beliggende mellem Køge og Ringsted, behandler ud over overfladevand fra Haraldsted og Gyrstinge Søer grundvand fra kildepladserne Valsømagle, Bøstofte, Vigersted, Gummersmarke, Almsgård, Ravneshave, Spanager, Ejby og Kulerup, som er en fællesbetegnelse for Svenstrup + Slimminge + Kimmerslev + Nr. Dalby. KV har landvæsenskommissionskendelse på årligt at måtte indvinde 16 mill. m^3 grundvand herfra.

Kildepladsernes beliggenhed fremgår bl.a. af bilag 5. Bøstofte, Valsømagle samt Vigersted er beliggende inden for Vigersdal Å's opland. Svenstrup og Slimminge (= ½ Kulerup) ligger ca. 2 km øst for det topografiske oplandsskel, mens de øvrige kildepladser ligger østligere. På figur 6.2.4 er vist, hvor store vandmængder KV har indvundet fra samtlige kildepladser, fra Bøstofte + Valsømagle + Vigersted samt fra Bøstofte + Valsømagle + Vigersted + ½ Kulerup. Det bemærkes, at grundvandsindvindingsretten for det samlede Regnemarkværk bliver næsten fuldt udnyttet, samt at de indvundne vandmængder inden for Haraldsted Sø's topografiske opland ved en fuld udnyttelse af indvindingsretten andrager 6-7 mill. m^3/år.



Figur 6.2.3 Overfladevandsindvindingens størrelse fra Haraldsted og Gyrstinge Søer.



Figur 6.2.4 Størrelsen af grundvandsindvindingen til Regnemarkværket.

6.2.3. Hydrologiske data

Der foreligger følgende relevante data:

a. Nedbørs-, temperatur- og fordampningsdata for perioden 1950-75 som beskrevet i afsnit 2.4.1. Ved beregning af arealnedbøren er benyttet følgende vægtning:
1950-55: 0.60 · Sorø + 0.40 · Haslev
1956-75: 0.75 · Allindelille + 0.25 · Sorø.

b. Vandføringsdata som beskrevet i afsnit 2.4.1. Her benyttes specielt

57.07 Ringsted Å, Torpet	01.01.50 - 31.12.56
57.08 Ringsted Å, Ll. Svenstrup	01.01.57 - 31.12.74
57.09 Vigersdal Å, Staveds Bro	03.04.59 - 31.12.69
57.15 Frøsmose Å, Møllegård	01.03.61 - 31.12.66.

c. Månedlige grundvandspejlinger i KV-boringer.

d. Årlige opgørelser over grundvandsindvindingens størrelse fordelt på de forskellige kildepladser.

e. Daglige data for overfladevandsindvindingens størrelse samt for den overpumpede vandmængde fra Gyrstinge Sø til Haraldsted Sø i perioden juni 1971 - sept. 1976.

f. Ugentlige observationer af vandspejlskoter i Haraldsted Sø 03.12.71 - 01.10.76 og i Gyrstinge Sø 21.7.72 - 01.10.76.

6.3. Kalibrering af nedbør-afstrømnings-model (NAM)

6.3.1 Indledning

NAM er blevet afprøvet på adskillige danske vandløb uden for Suså-systemet. I denne undersøgelse er NAM blevet kalibreret på 7 af Susåens deloplande. Resultaterne herfra er anført og diskuteret i kapitel 2.

Her skal blot foretages en uddybning af de i afsnit 2.4 angivne resultater og diskussioner fra 2 i denne sammenhæng specielt interessante deloplande, nemlig Frøsmose Å og Vigersdal Å.

6.3.2. Frøsmose Å

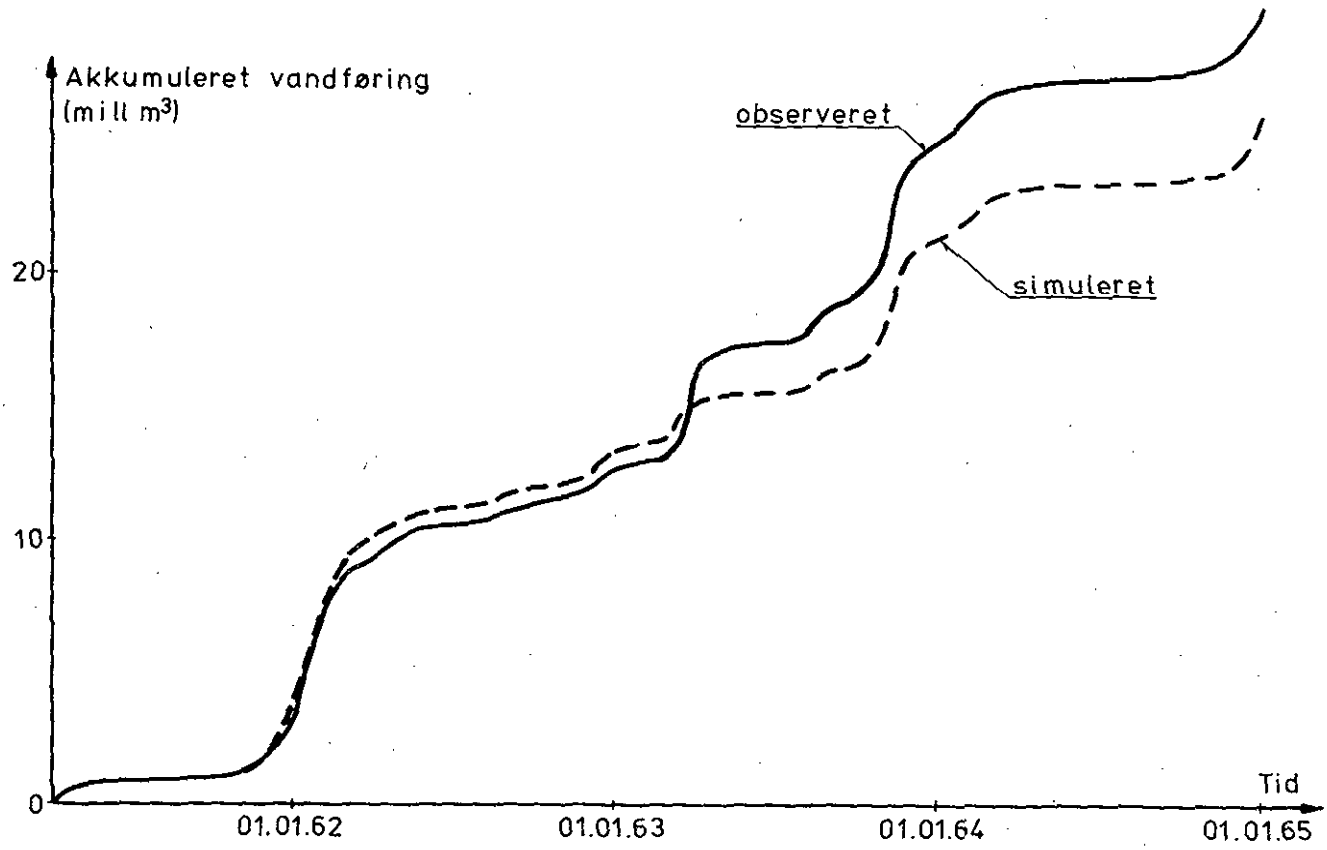
Frøsmose Å udgør med et opland på 44 km^2 ca. 70% af hele Gyrstinge Sø's afstrømningsopland. Vandløbet er kendetegnet ved et hurtigt og kraftigt respons på nedbør, hvilket hænger sammen med oplandets relativt lille størrelse og den kendsgerning, at vandløbssystemet, som skitseret på figur 6.2.1, hovedsageligt består af ét hovedvandløb med mange små sidetilløb.

Parameterværdierne, som er opnået ved kalibrering over hele perioden 1961-66, er angivet i tabel 2.4.1. På figur 2.4.9 er vist kalibreringskørslen for perioden 1962-64. Eftersom det i denne forbindelse er specielt væsentligt at få et overblik over de akkumulerede afstrømmede vandmængder, er de akkumulerede vandmængder for den observerede og den af NAM simulerede vandføring sammenlignet for perioden 01.03.61 - 31.12.64. Grunden til, at 1965-66 ikke er medtaget i denne sammenligning, er, at vandføringsobservationerne i disse 2 år er mangelfulde. Resultatet er vist på figur 6.3.1. Man ser her, ligesom ved hydrograferne på figur 2.4.9, at NAM's beskrivelse af afstrømningsforløbet er udmærket med undtagelse af uoverensstemmelsen i 1963, som er forklaret i afsnit 2.4.

6.3.3. Vigersdal Å

Vigersdal Å udgør med et opland på 72 km^2 ca. 70% af Haraldsted Sø's afstrømningsopland. Vandløbet er i forhold til Frøsmose Å kendetegnet ved et langsomt og svagt respons, hvilket kan skyldes, at vandløbssystemet består af flere næsten lige store hovedløb, hvoraf nogle har et lille fald.

Afstrømningsområdet er påvirket af grundvandsindvindingen til Regnemark. Perioden med vandføringsdata indeholder nogle år, 1960-64, hvor vandindvindingen endnu ikke er startet, samt nogle år, 1965-68, hvor der ikke foretages vandindvinding inden for selve området, men hvor sænkningstragtene fra kildepladserne længere østpå breder sig ind i området og således påvirker grundvands- og infiltrationsforholdene inden for området. Grundvandsindvindingen fra Bøstofte, Valsømagle og Vigersted startede i 1968/69 (01.04.68 - 31.03.69), således at vandløbsafstrømningen specielt det sidste år med vandføringsdata, 1969, må formodes at være påvirket af grundvandsindvindingen. Situationen for afstrømningsområdet i perioden 1965-69 må absolut betegnes som ikke-stationær, hvad man

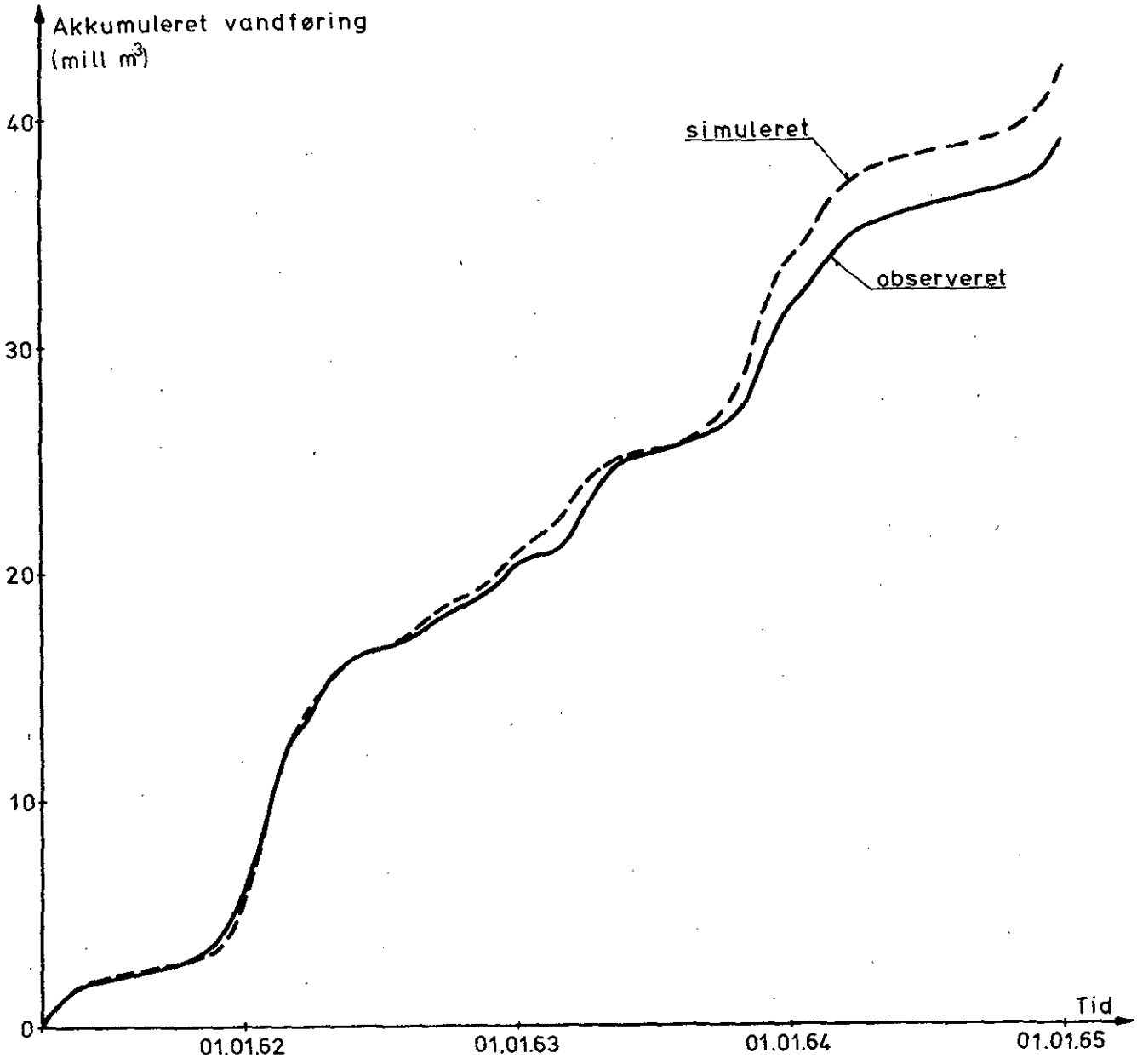


Figur 6.3.1 Sammenligning mellem simuleret og observeret vandføring 01.04.1961 - 31.12.1964 for Frøsmose Å.

bl.a. kan se på de stadigt faldende trykniveauer for det primære grundvandsmagasin (se f.eks. tabel 6.5.1). Derfor er en forudsigelse af grundvandsindvindingens indflydelse og afstrømningsområdets nye hydrologiske ligevægtssituation forbundet med en ikke ubetydelig usikkerhed.

Model-kalibreringen er herefter foretaget dels med det formål at bestemme parameterværdierne for situationen før grundvandsindvindingens start og dels for at undersøge, hvilken indvirkning den begyndende grundvandsindvinding har haft på parameterværdierne.

På figur 2.4.8 er vist kalibreringskørslen for perioden 1962-64 med de i tabel 2.4.1 angivne parameterværdier svarende til situationen før grundvandsindvindingen. På figur 6.3.2 er vist en sammenligning mellem de akkumulerede vandmængder for den observerede og den af NAM simulerede vandføring for perioden 01.03.61 - 31.12.64. Herudfra må NAM's beskrivelse af afstrømningsforløbet i Vigersdal Å, før grundvandsindvindingen startede, siges at være udmærket.



Figur 6.3.2 Sammenligning mellem simuleret og observeret vandføring 01.04.1961 - 31.12.1965 for Vigersdal Å.

Af NAM's parametre skønnedes magasinkapaciteterne U^* og L^*, snesmeltekonstanten C_S samt tidskonstanten K_{OI} at være upåvirkede af en grundvandsindvinding. Disse 4 parametre er derfor holdt konstant ved de efterfølgende parameteroptimeringer. Grundvandsparameteren C_{AREAL}, som er et mål for, hvor stor en del af den perkolerede vandmængde, der når frem til vandløbene inden for det pågældende topografiske opland, kan absolut ikke forventes at være uafhængig af en grundvandsindvinding, idet den oppumpede vandmængde må opfattes som gående tabt for vandløbets opland. Ligeledes må tilskuddet Q_{BF} fra det paleocæne grundvandsmagasin til vandløbene forventes at være påvirket af en grundvandsindvinding.

C_{AREAL} og Q_{BF} er imidlertid uegnede til numerisk optimering, hvorfor de har været holdt konstant lig henholdsvis 1 og 50 l/s. NAM's øvrige 6 parametre er herefter blevet optimeret ved hjælp af den i kapitel 2 omtalte automatiske kalibreringsrutine for at klarlægge, i hvor vid udstrækning parameterværdierne ændrer sig i løbet af den 10-årige periode. Ved at holde C_{AREAL} og Q_{BF} konstante ved disse parameteroptimeringer kan man således primært få oplysning om, hvorvidt afstrømningsforløbet har ændret sig eller ikke, og sekundært få en indikation om de parameterværdier, som bedst beskriver de eventuelt ændrede afstrømningsforhold. De vigtigste resultater er vist i tabellerne 6.3.1 og 6.3.2. Følgende 3 hovedkonklusioner kan fremhæves af resultaterne:

a. Der er en meget fin overensstemmelse mellem middelværdierne af de enkelte års parameteroptimeringer og flereårs-optimeringerne 1960-64, 1965-69 og 1961-68. Den eneste store uoverensstemmelse skyldes værdien af K_B i 1960.

b. Der er en signifikant drift i nogle af parameterværdierne. F.eks. viser en statistisk normalfordelingstest, at en hypotese om, at de 5 C_{OF}-værdier for 1960-64 har samme middelværdi som de 5 C_{OF}-værdier for 1965-69, forkastes på et 5% signifikansniveau.

c. Forskellen mellem de observerede og de simulerede vandmængder er specielt stor i 1969, hvor den simulerede vandføring er 0.11 mm/dag, svarende til 0.11 mm/dag · 365 dage · 72 km^2 = 2.9 mill. m^3, større end den observerede vandføring. Dette kan sammenholdes med, at kildepladserne Valsømagle, Bøstofte og først og fremmest Vigersted startede i 1968/69, samt at der ved prøvepumpninger i dette område er konstateret lækage, d.v.s. perkolation til det paleocæne grundvandsreservoir fra sekundære reservoirer i de overlejrende kvartære formationer, der består af diluvialsand + moræneler. Man kan herefter formode, at grundvandsindvindingen, via en sænkning af trykniveauet, har medført en forøget infiltration til de sekundære reservoirer. En sådan situation, hvor en del af nedbøren perkolerer til et grundvandsreservoir, hvorfra det pumpes væk, svarer i NAM til, at C_{AREAL} skulle have haft en mindre værdi end 1.0.

Parameter	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	60-64	65-69	61-68
C_{OF}	0.62	0.69	0.57	0.83	0.45	0.42	0.29	0.45	0.51	0.29	0.61	0.37	0.53
C_{L2}	0.74	0.55	0.79	0.82	0.85	0.0	0.71	0.61	0.73	0.46	0.69	0.48	0.61
C_{IF}	0.064	0.072	0.008	0.041	0.019	0.026	0.052	0.045	0.022	0.011	0.047	0.029	0.036
C_{L1}	0.66	0.26	0.51	0.81	0.38	0.64	0.79	0.68	0.01	0.51	0.66	0.58	0.53
C_{LG}	0.40	0.87	0.70	0.31	0.66	0.69	0.38	0.53	0.56	0.72	0.66	0.48	0.51
K_B^{-1} (dag^{-1})	0.112	0.012	0.008	0.004	0.015	0.030	0.046	0.023	0.045	0.016	0.003	0.035	0.018
QTM-QVM (mm/dag)	-0.03	0.01	0.02	-0.00	0.01	0.03	0.02	0.05	-0.01	0.11	0.02	0.05	0.03

QTM-QVM = forskellen mellem den gennemsnitlige simulerede og den gennemsnitlige observerede vandføring.

Tabel 6.3.1 Resultater fra kalibreringer over forskellige tidsperioder for Vigersdal Å.

	1960-64		1965-69		1961-68	
Parameter	middel-værdi	spred-ning	middel-værdi	spred-ning	middel-værdi	spred-ning
C_{OF}	0.63	0.14	0.39	0.10	0.53	0.17
C_{L2}	0.75	0.12	0.50	0.30	0.63	0.28
C_{IF}	0.040	0.027	0.031	0.016	0.036	0.021
C_{L1}	0.52	0.22	0.53	0.31	0.51	0.28
C_{LG}	0.59	0.23	0.58	0.14	0.59	0.18
K_B^{-1} dag^{-1}	0.030	0.046	0.032	0.013	0.023	0.016

Tabel 6.3.2 Middelværdi og spredning af de i tabel 6.3.1 opførte enkeltårs optimerede parametre over forskellige tidsperioder.

Ved simulering af afstrømningen i Vigersdal Å i en situation med fuld grundvandsindvinding kan man af det foregående konkludere, at man må benytte andre værdier end de i tabellerne 6.3.1 og 6.3.2 nævnte samt en $C_{AREAL} < 1.0$. Den mest nøjagtige værdi af C_{AREAL} kan man ikke bestemme uden at gå ind i en detaljeret undersøgelse af grundvands- og lækageforhold, men som et skøn er benyttet

$$C_{AREAL} = \frac{\text{perkoleret vandmængde - oppumpet vandmængde}}{\text{perkoleret vandmængde}}$$

Den perkolerede vandmængde kan bestemmes ved en NAM-simulering med det i tabel 2.4.1 angivne parametersæt for Vigersdal Å, som svarer til en situation med grundvandsindvinding. For perioden 1950-75 giver en sådan simulering en gennemsnitlig perkoleret vandmængde på 84 mm pr. år. Dette giver med f.eks en oppumpet vandmængde på 6 mill. m^3/år inden for Haraldsted Sø's afstrømningsopland på 105 km^2

$$C_{AREAL} = \frac{84 \text{ mm} \cdot 105 \text{ km}^2 - 6 \text{ mill. m}^3}{84 \text{ mm} \cdot 105 \text{ km}^2} = 0.32$$

Det har herefter været forsøgt ved nogle parameteroptimeringer at variere C_{AREAL} og Q_{BF} lineært fra 1.0 og 50 l/s i 1964 til 0.70 og 25 l/s i 1969, svarende til at virkningen af grundvandsindvindingen steg lineært fra nul i 1964 til fuld virkning (C_{AREAL} = 0.32, Q_{BF} = 0 l/s) i 1974. Resultaterne af disse optimeringer gav stort set de samme resultater som i tabel 6.3.1 hvad angår de 6

optimerede parametre, men med den forskel at vandbalancen QTM-QVM nu stemte væsentligt bedre.

Det kan således konkluderes, at grundvandsindvindingen til Regnemark har medført signifikant ændrede afstrømningsforhold i Vigersdal Å's opland sammenlignet med situationen før grundvandsindvindingen. De på det foreliggende grundlag foretagne skøn af de NAM-parameterværdier, som svarer til en situation med fuld grundvandsindvinding, er anført i tabel 2.4.1. Til verifikation af disse skøn for de nye parameterværdier ville det have været ønskeligt med vandføringsdata fra Vigersdal Å for de senere år, hvor det kan formodes, at en ny ligevægtssituation er ved at indstille sig i området. Ud fra et ønske om at kunne skønne, hvor meget indstrømningen til Haraldsted Sø er blevet reduceret som følge af grundvandsindvindingen, er det specielt vigtigt at få verificeret C_{OF}- og C_{AREAL}-værdierne. En indirekte kontrol på, at de nye parameterværdier - og her specielt C_{OF} og C_{AREAL} - er tilfredsstillende, når det gælder NAM's evne til at simulere akkumulerede vandmængder, gives i afsnit 6.4.

6.4. Beregning af indstrømningen til Haraldsted Sø 1972-74

6.4.1. Indledning

Her er forsøgt givet en vurdering af indstrømningen til Haraldsted Sø i perioden august 1972 - december 1974. Der er anvendt to forskellige beregningsmetoder til at nå resultatet. Ved den ene metode simuleres indstrømninger ved hjælp af NAM med de i tabel 2.4.1 angivne parameterværdier for Vigersdal Å. Den væsentligste usikkerhed ved denne fremgangsmåde er de benyttede parameterværdier for en situation med grundvandsindvinding. Ved den anden metode tages udgangspunkt i de observerede data for søvandspejlskoter, overfladevandsindvinding, overpumpning af vand mellem de to søer og observeret vandføring i Ringsted Å. Disse data benyttes sammen med en simulering af indstrømningen til Gyrstinge Sø til at beregne en indstrømning til Haraldsted Sø.

6.4.2. Direkte simuleringer ved anvendelse af NAM

Ved simulering af indstrømning til Haraldsted Sø fra det 105 km^2 store opland er anvendt de samme modelparametre som angivet for

Vigersdal Å's 72 km^2 store opland. Denne extrapolation må siges at være rimelig, eftersom de vigtigste af NAM's parametre ikke varierer særlig meget inden for hele Suså-systemet, og eftersom de geologiske og hydrologiske forhold ikke antyder, at de resterende 33 km^2 skulle give væsentligt forskellige afstrømningsforhold fra de 72 km^2 inden for Vigersdal Å.

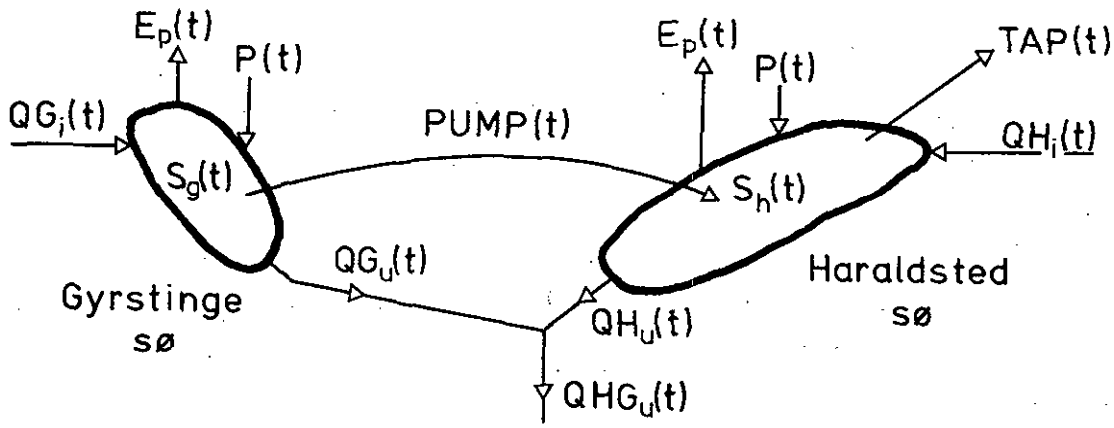
Der er herefter simuleret to forskellige indstrømningsserier, nemlig

QH_i', hvor der er anvendt de i tabel 2.4.1 angivne parametre for en situation uden grundvandsindvinding, og

QH_i'', hvor der er anvendt de i tabel 2.4.1 angivne parametre for en situation med grundvandsindvinding, svarende til en oppumpning på 6 mill. m^3/år inden for det 105 km^2 store opland.

6.4.3. Indirekte beregning ved hjælp af vandbalanceberegninger for hele Haraldsted-Gyrstinge Sø-systemet

Ved beregningerne er anvendt de på figur 6.4.1 viste betegnelser.



Figur 6.4.1 Haraldsted-Gyrstinge Sø-systemet. Betegnelserne er forklaret i teksten.

Beregningerne over indstrømningen til Haraldsted Sø QH_i er foretaget på følgende måde:

a. Indstrømningen til Gyrstinge Sø $QG_i(t)$ er simuleret med NAM ud fra nedbørs-, temperatur- og fordampningsdata. Som parameterværdier til hele afstrømningsoplandet er benyttet de i tabel 2.4.1 angivne værdier for Frøsmose Å.

b. Med hensyntagen til indstrømning $QG_i(t)$, magasinering, $S_g(t) - S_g(t-1)$, beregnet ud fra de observerede vandspejlskoter, overpumpet vandmængde fra Gyrstinge Sø til Haraldsted Sø, PUMP(t), samt nedbør på og fordampning fra søoverfladen, $P(t) - E_p(t)$, er udstrømningen fra Gyrstinge Sø, $QG_u(t)$, beregnet.

$$QG_u(t) = QG_i(t)-[S_g(t)-S_g(t-1)]-PUMP(t)+P(t)-E_p(t)$$

Fordampningen fra en søoverflade er her og i det følgende som en tilnærmelse sat lig den målte potentielle evapotranspiration.

c. Udstrømningen fra Haraldsted Sø $QH_u(t)$ er herefter beregnet som differencen mellem den samlede udstrømning fra begge søer $QHG_u(t)$ og den beregnede udstrømning fra Gyrstinge Sø $QG_u(t)$

$$QH_u(t) = QHG_u(t) - QG_u(t)$$

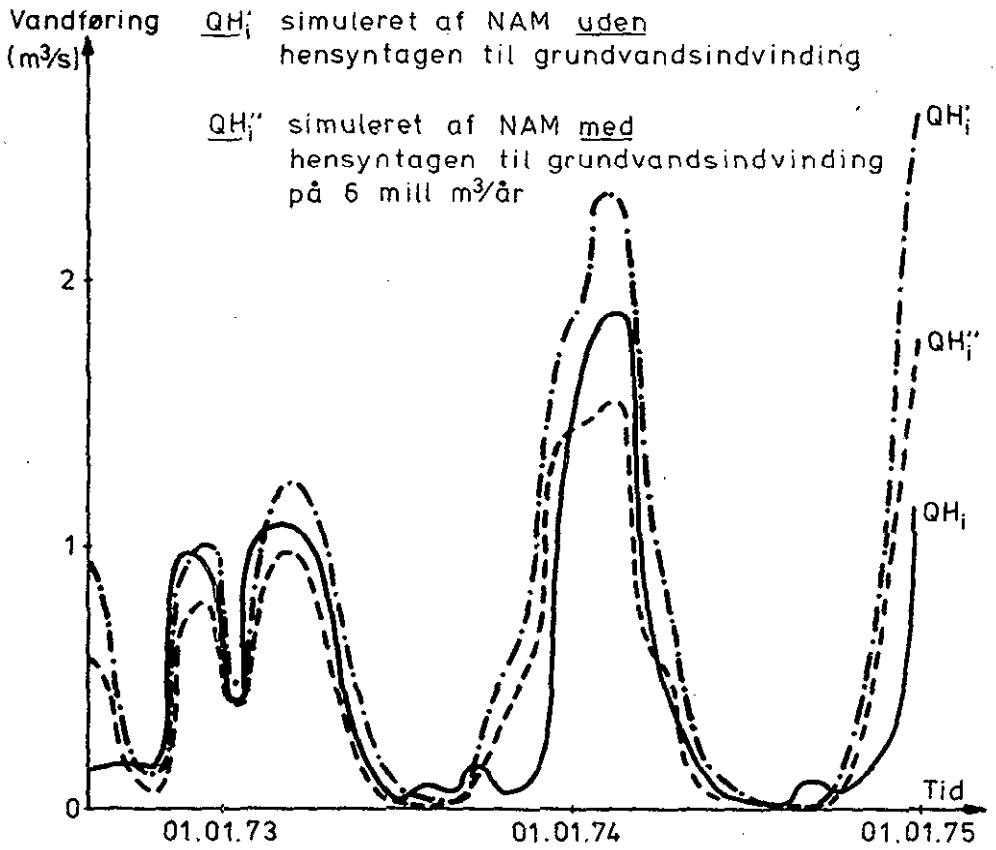
$QHG_u(t)$ findes ved at vægte den observerede vandføring ved Ringsted Å, Ll. Svenstrup, med forholdet mellem søernes afstrømningsopland (incl. søerne) og målestationens opland, d.v.s. 170 km^2/195 km^2.

d. Endelig er indstrømningen til Haraldsted Sø $QH_i(t)$ beregnet under hensyntagen til udstrømningen $QH_u(t)$, magasineringen $S_h(t) - S_h(t-1)$ beregnet ud fra observerede vandspejlskoter, overpumpet vandmængde fra Gyrstinge Sø PUMP(t), aftapning af vand til overfladevandværket i Regnemark TAP(t) samt nedbør på og fordampning fra søoverfladen $P(t) - E_p(t)$

$$QH_i(t) = QH_u(t)+[S_h(t)-S_h(t-1)]-PUMP(t)+TAP(t)-P(t)+E_p(t)$$

6.4.4. Vurdering af resultaterne

På figur 6.4.2 er vist de 3 hydrografer QH_i, QH_i' og QH_i'', hvor vandføringerne er midlet over 4 ugers perioder. De akkumulerede vandføringer ΣQH_i, $\Sigma QH_i'$ og $\Sigma QH_i''$ over hele perioden er vist på figur 6.4.3. Heraf ser man tydeligt, at QH_i falder ganske godt sammed med QH_i'', mens QH_i' er en ensidig overestimation af indstrømningen til søen.



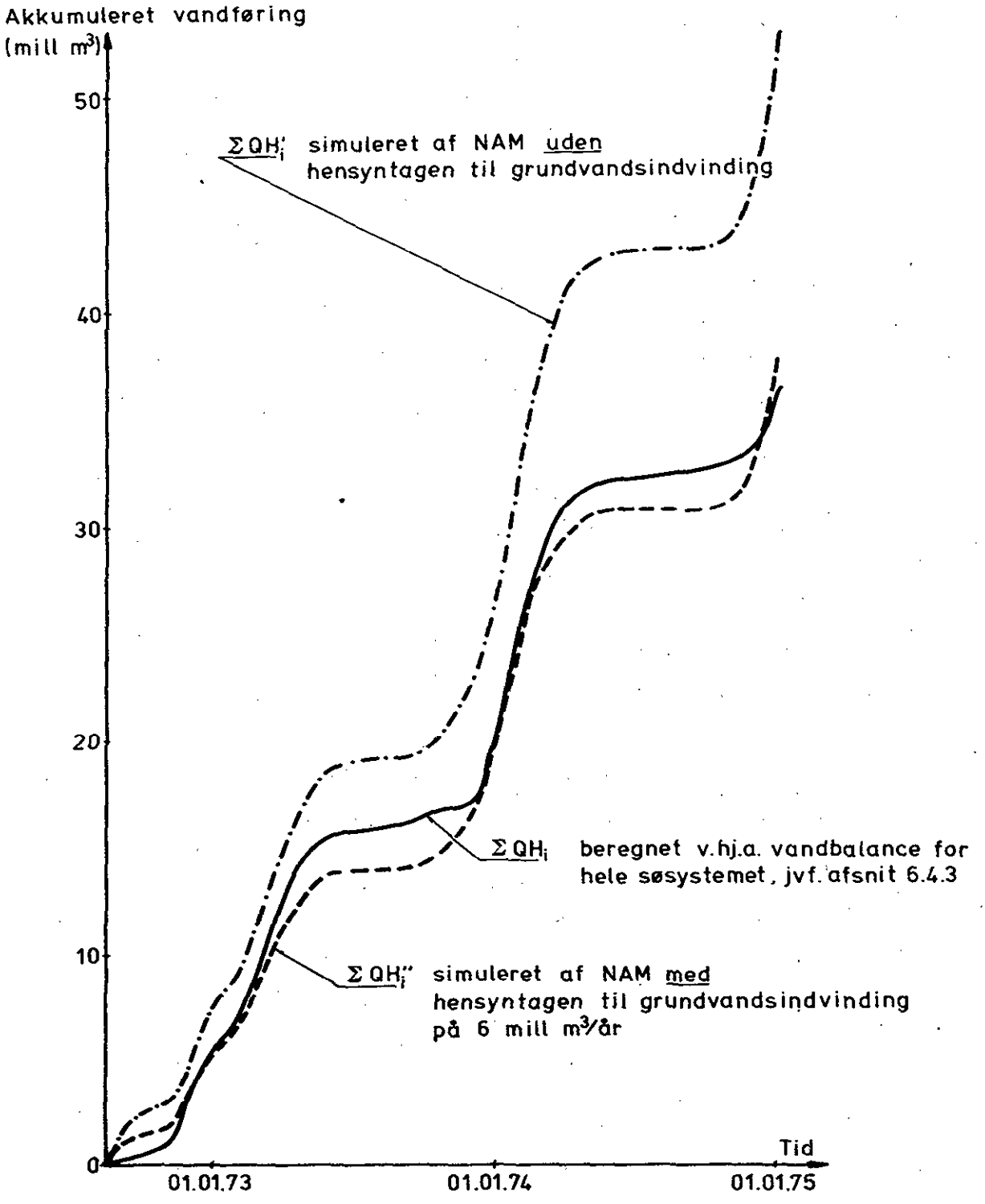
Figur 6.4.2 Indstrømning til Haraldsted Sø i perioden 11.08.72 - 27.12.74.

Ved en vurdering af resultaternes pålidelighed er det vigtigt at vurdere, hvilken indflydelse usikkerhederne med hensyn til data og forudsætninger kan have på resultaterne. I den forbindelse er der gjort følgende overvejelser:

Usikkerhederne ved NAM-simuleringen af den indstrømning QH_i', der ville have været, såfremt der ikke havde været nogen grundvandsindvinding, må vurderes som relativt små. Denne vurdering bygger dels på den erfaring, der er opnået med NAM på andre afstrømningsområder, og dels på kalibreringsresultaterne fra perioden 1960-64, hvor de simulerede og de observerede vandmængder stemmer udmærket overens.

Usikkerhederne ved NAM-simuleringen af den aktuelle indstrømning QH_i'' med hensyntagen til grundvandsindvinding må vurderes som væsentligt større. Den største usikkerhed, hvad angår de akkumulere-

de vandmængder, ligger i fastlæggelsen af C_{AREAL}. Ved beregningen af QH_i'' er forudsat, at reduktionen af indstrømningen til Haraldsted Sø i gennemsnit vil være 6 mill. m^3/år, hvilket, jfr. figur 6.2.4, umiddelbart må vurderes som værende af den rigtige størrelsesorden.



Figur 6.4.3 Akkumuleret indstrømning til Haraldsted Sø regnet fra 11.08.72 til 27.12.74.

Usikkerhederne i forbindelse med QH_i-beregningen omfatter både usikkerhederne ved NAM-simuleringen af indstrømningen til Gyrstinge Sø QG_i og datausikkerhederne ved QHG_u, P, E_p, TAP, PUMP samt søvandspejlskoterne. Hvad angår QG_i må gælde de samme vurderinger som ved QH_i, nemlig at usikkerhederne er relativt små. Usikkerhederne i forbindelse med dataene QHG_u, P og E_p må anses for at være små og tilfældige, således at de ikke kan have nogen væsentlig indflydelse på de akkumulerede vandmængder. TAP, PUMP og søvandspejlskoterne er fremskaffet fra KV; usikkerhederne ved disse data må anses for små og tilfældige, således at deres betydning bliver forsvindende på de akkumulerede vandmængder.

Som en fælles usikkerhedskilde bør nævnes den tilnærmelse, der ligger i at benytte modelparametre, som er kalibrerede til et opland på et udvidet opland med en størrelse på ca. 1½ gange det oprindelige. Denne usikkerhedskilde kan dog, som omtalt i afsnit 6.4.2, ikke forventes at have nogen væsentlig betydning.

Som konklusion kan man fastslå, at indstrømningen til Haraldsted Sø er blevet væsentligt reduceret på grund af grundvandsindvindingen til Regnmemark. De her anførte beregninger tyder på, at reduktionen er på gennemsnitligt ca. 6 mill. m^3/år.

6.5. Forøget nedsivning som følge af faldende grundvandstrykniveau inden for Haraldsted Sø's opland.

Grundvandsindvindingen til Regnemarkværket har betydet et fald i grundvandstrykniveauerne. Som tidligere nævnt findes der en ikke ubetydelig lækage i området, hvilket vil sige, at afsænkninger i det primære trykniveau har induceret en forøget perkolation fra de sekundære reservoirer.

Et skøn over denne perkolations størrelse kan man få ved at multiplicere lækagekoefficienten med de observerede sænkninger i området. I tabel 6.5.1 er beregnet perkolationens størrelse fra de delområder af Haraldsted Sø's afstrømningsopland, hvor der ifølge grundvandsmodellen findes lækage (jfr. kapitel 1).

Det skal her understreges, at grundvandsmodellen ikke er finkalibreret i denne nordlige del af Susåens opland, idet de aktuelle grundvandsforhold nord for Ringsted kun skønnes at være af underordnet betydning for den påtænkte indvinding i Suså-Vendebæk om-

Polygon i grundvands-model	Areal (km^2)	Lækage-koefficient $P/m' \times 10^9$ (s^{-1})	Sænkning (m)	1969 Perkola-tion (mm/år)	Perkola-tion (mill. m^3/år)	Sænkning (m)	1975 Perkola-tion (mm/år)	Perkola-tion (mill. m^3/år)
60*	7	2	2	125	0.88	4	250	1.75
61*	7	1	2	60	0.42	4	125	0.88
63	34	0.7	3-4	75	2.55	5-6	120	4.08
64	7	1	2	60	0.42	3-4	125	0.88
67*	9	1	3	95	0.86	4	125	1.12
Samlet perkolation					5.13			8.71

* Kun ca. halvdelen af polygonen er beliggende inden for oplandet.

Tabel 6.5.1 Beregning af den lækage-frembragte perkolation inden for Haraldsted Sø's afstrømningsopland.

rådet. De nedenfor anvendte lækagekoefficienter (fundet ved kalibrering) svarer derfor kun i nogen grad til de ved analyse af prøvepumpninger på kildepladserne fundne. Som angivet i tabel 1.5.1 andrager disse lækagekoefficienter 10, 5 og 1 × 10^{-9} s^{-1} for henholdsvis Vigersted, Bøstofte og Valsømagle kildepladser.

De anvendte sænkninger er også behæftet med en vis usikkerhed, da de dels er middeltal for en hel polygon (der her kan omfatte 10-20 observationsboringer), dels fremkommer som en skønnet drift overlejret af sæsonfluktuationer.

Som man ser af tabel 6.5.1, er denne af grundvandsindvindingen inducerede perkolation af samme størrelsesorden som selve grundvandsindvindingen. I en ligevægtssituation må vandet til denne perkolation komme dels fra en forøget infiltration til de sekundære reservoirer dels ved, at noget af den vandafgivelse, der tidligere fandt sted fra de sekundære reservoirer til vandløbene, nu på grund af formindskede trykniveauer i det primære reservoir er omdannet til perkolation til dette. Man må følgelig forvente, at den forøgede nedsivning modsvares af en tilsvarende formindsket vandafgivelse til vandløbene.

6.6. Konklusion vedrørende grundvandsindvindingens indflydelse på indstrømningen til Haraldsted Sø

Som konklusion må det fastslås, at grundvandsindvindingen til Regnemarkværket skønsmæssigt har reduceret indstrømningen til Haraldsted Sø med gennemsnitligt 6 mill. m^3/år. Størrelsesordenen 6 mill. m^3/år er bekræftet af tre beregningsmåder byggende på uafhængigt målte data: For det første giver de oppumpede vandmængder inden for oplandet, som vist på figur 6.2.4, et første groft skøn i denne størrelsesorden. For det andet er der, som beskrevet i afsnit 6.4, en god overensstemmelse mellem den af NAM simulerede indstrømning QH_i'' under hensyntagen til 6 mill. m^3 grundvandsindvinding pr. år og den ud fra andre data beregnede indstrømning QH_i. Endelig for det tredie giver et skøn over den forøgede perkolation til paleocænet som følge af faldende trykniveau, som beskrevet i afsnit 6.5, et tal i samme størrelsesorden.

6.7. Vandindvinding fra Haraldsted og Gyrstinge Søer

6.7.1. Indledning

Som konkluderet i de forrige kapitler må grundvandsindvindingen inden for Haraldsted Sø's opland skønnes at have medført en reduktion i tilstrømningen til søen på ca. 6 mill. m^3/år. Beregningerne i dette kapitel bygger på denne konklusion. Der er foretaget beregninger af såvel indvindingsmulighederne fra søerne som af de deraf følgende konsekvenser for vandføringen i Ringsted Å og hyppigheden af brud på kotekriterierne.

Ifølge landvæsenskommissionens kendelse har KV i forbindelse med overfladevandsindvindingen pligt til at overholde de i afsnit 6.2.1 nævnte kote- og afstrømningskriterier. Idet indstrømningen til søerne kan betragtes som stokastisk, vil der imidlertid altid, med en given vandindvinding, være en vis sandsynlighed for, at de ovenfor nævnte kriterier ikke alle kan overholdes. Derfor er kravet om en absolut overholdelse af visse kriterier reelt umuligt at opfylde til enhver tid, hvorfor det ville være ønskeligt med nogle mere operationelle krav. Sådanne krav kunne f.eks. bestå i angivelser af tilladelig hyppighed for overskridelse af kotekriterier, afstrømningskriterier etc. Derfor vil der i det følgende blive lagt vægt på at bestemme, hvilke konsekvenser en given overfladevandsindvinding med en given aftapningspolitik vil få for hyppigheden af brud på et kotekriterium, på længden af perioder med minimal afstrømning m.v.

6.7.2. Reservoirpolitik

For at kunne udnytte magasinvoluminet i Haraldsted og Gyrstinge Søer optimalt og for bedst muligt at kunne overholde de stillede krav til koter og udledning er man nødt til at have en reservoirpolitik, som fortæller, hvordan man i givne situationer styrer vandstrømmene gennem søsystemet. En reservoirpolitik omfatter bl.a. en tapningspolitik, en pumpepolitik og en udledningspolitik.

Tapningspolitikken angiver, i hvilken takt man skal aftappe vandet til vandindvinding. Af hensyn til vandværksdriften, herunder en maksimal kapacitet på såvel vandværk som pumper, og kontinuiteten i forbruget vil det oftest være ønskeligt med en konstant aftapning, jfr. [13]. I denne undersøgelse forudsættes en konstant dag-

lig aftapning, TAPMAX, som dog afbrydes i de perioder, hvor vandspejlet i søerne er under de fastsatte minimumskoter. Der er udført beregninger med 4 forskellige daglige aftapningsmængder svarende til henholdsvis TAPMAX = 475 l/s ~ 15 mill. m^3/år (benævnt tilfælde A), TAPMAX = 396 l/s ~ 12.5 mill. m^3/år (B), TAPMAX = 317 l/s ~ 10 mill. m^3/år (C) og TAPMAX = 238 l/s ~ 7.5 mill. m^3/år (D).

Pumpepolitikken angiver, i hvilke situationer man skal pumpe vand fra den ene sø til den anden. Eftersom tapningen kun foregår fra Haraldsted Sø, er det nødvendigt at pumpe vand fra Gyrstinge Sø til Haraldsted Sø i sommerhalvåret. Tilsvarende kan det i forbindelse med reservoirernes opfyldning være nødvendigt at pumpe vand fra det mindste reservoir med den største indstrømning, Haraldsted Sø, til det største reservoir med den mindste indstrømning, Gyrstinge Sø. På grund af den begrænsede pumpekapacitet mellem de to søer er det nødvendigt at have en langsigtet pumpepolitik, der fastsætter, i hvilke situationer der skal pumpes. Ellers risikerer man at komme i en situation, hvor magasinet i Gyrstinge Sø er delvis fyldt op, samtidig med at man ikke kan udnytte tapningsretten fuldt ud, fordi Haraldsted Sø er tømt ned til minimumskoten. Tilsvarende kan man "spilde" vand, når kun det ene magasin er helt fyldt op, og det overskydende vand fra dette "løber væk" i Ringsted Å. Den i de følgende beregninger anvendte pumpepolitik indeholder regler om pumpning ved nærmere angivne opfyldningsgrader i de to søer. Disse opfyldningsgrader er fundet empirisk ved at betragte simuleringer af søsystemet i 26-års perioden 1950-75.

Udledningspolitikken angiver, hvor store vandmængder man i hvilke situationer skal udlede til Ringsted Å. Generelt set bør udledningspolitikken fastsættes af samfundet for at sikre en optimal udnyttelse af vandressourcerne i overensstemmelse med en af samfundet opstillet målsætning for recipienternes udnyttelse. Ved fastsættelsen af udledningspolitikken bør der således tages hensyn til udnyttelsen af vandet længere nede i vandløbssystemet, omfattende rekreativ udnyttelse, spildevandsudledning, markvanding, dambrug (ikke aktuelt her) m.v. I det aktuelle tilfælde er det eneste udledningskrav som tidligere nævnt kravet om en minimumsudledning til Ringsted Å på 170 l/s fordelt med 100 l/s fra Haraldsted Sø og 70 l/s fra Gyrstinge Sø. Den optimale udlednings-

politik vil da, set fra vandforsyningsside, være at begrænse udledningen til 170 l/s, så længe magasinerne ikke er fyldt op, og ellers udlede den del af tilstrømningen, der ikke indvindes. Den udledningspolitik, der udelukkende baseres på dette krav, vil, som belyst i næste afsnit, medføre, at vandføringen i Ringsted Å holdes konstant på 170 l/s gennem meget lange perioder. For at eksemplificere hvilke konsekvenser udledningspolitiken har på såvel indvindingsmulighederne som udledningsforholdene, er der udført beregninger svarende til 3 forskellige udledningspolitikker. Tilfælde I, hvor det eneste krav er en udledning på 170 l/s. Tilfælde II, hvor den minimale udledning i hver måned er fastsat som halvdelen af den i perioden 1950-71 observerede månedlige medianminimumsvandføring (MMM). Tilfælde III, hvor den minimale udledning i hver måned er lig MMM. MMM er bestemt ud fra vandføringsdata fra Ringsted Å målestationerne 57.07 og 57.08 vægtet med 170 km^2/205 km^2 henholdsvis 170 km^2/195 km^2. MMM er da medianen af de 22 månedsminimumsvandføringer, beregnet som daglig vandføring. MMM er sammen med de 3 serier af månedlige minimumsudledninger vist i tabel 6.7.1.

	MMM (l/s)	I (l/s)		II (l/s)		III (l/s)	
	Har.+ Gyr.	Har.	Gyr.	Har.	Gyr.	Har.	Gyr.
jan.	1430	100	70	430	295	860	570
feb.	1430	100	70	430	295	860	570
mar.	1100	100	70	325	225	660	440
apr.	870	100	70	255	180	520	350
maj	350	100	70	100	75	210	140
jun.	160	100	70	100	70	100	70
jul.	110	100	70	100	70	100	70
aug.	140	100	70	100	70	100	70
sep.	150	100	70	100	70	100	70
okt.	230	100	70	100	70	140	90
nov.	260	100	70	100	70	160	100
dec.	800	100	70	235	165	480	320
Samlet udledning		5.36 mill. m^3/år		10.54 mill. m^3/år		18.79 mill. m^3/år	

Tabel 6.7.1 Månedlige medianminimumsvandføringer (MMM) samt de 3 udledningspolitikkers minimumskrav for udledningen fra Haraldsted og Gyrstinge Søer.

Idet følgende betegnelser anvendes

H_g = vandspejlskote i Gyrstinge Sø

H_h = vandspejlskote i Haraldsted Sø

S_g = magasinindhold i Gyrstinge Sø

S_h = magasinindhold i Haraldsted Sø

TAP = aftappet vandmængde til vandindvinding

Q_{HG} = udledning af vand til Ringsted Å fra Haraldsted og Gyrstinge Søer

PUMP = pumpning af vand fra Gyrstinge til Haraldsted Sø

$\vee$ = enten ... eller

$\wedge$ = både ... og

$\Rightarrow$ = medfører

er de i de følgende beregninger anvendte reservoirpolitikker fastlagt ved:

Tapning

$H_h \leqq 21.00 \Rightarrow TAP = 0$

$H_h > 21.00 \Rightarrow TAP = TAPMAX$

Udledning

$(H_h \leqq 21.00) \vee (H_g \leqq 21.60) \Rightarrow Q_{HG} = 170$ l/s

$(21.00 < H_h < 23.50) \wedge (21.60 < H_g < 24.50) \Rightarrow Q_{HG}$ bestemmes af udledningspolitik I, II eller III jfr. tabel 6.7.1.

Såfremt et eller begge magasiner er fyldt op, sker der overløb fra de(t) pågældende magasin(er), således at Q_{min} er større end de i tabel 6.7.1 angivne mængder.

Pumpning

Der iværksættes pumpning i følgende situationer:

$(H_h < 21.00) \wedge (H_g > 21.60) \Rightarrow PUMP = 390$ l/s

$(H_h > 21.00) \wedge (H_g < 21.60) \Rightarrow PUMP = -390$ l/s

$(H_h < 22.55) \wedge (H_g > 23.40) \Rightarrow PUMP = 390$ l/s

$(H_h < 22.30) \wedge (S_h < S_g)$ $\Rightarrow$ *PUMP* = 390 l/s

$(H_h > 22.30) \wedge (H_g < 22.95)$ $\Rightarrow$ PUMP = -390 l/s

$(H_h > 22.30) \wedge (S_h < 0.66 \cdot S_g)$ $\Rightarrow$ PUMP = -390 l/s

6.7.3. Beregninger af de hydrologiske konsekvenser af vandindvinding fra søerne

Til beregning af en vandindvindings konsekvenser på koteforhold og afstrømningsforhold er der opbygget en EDB-model. Modellen beskriver vandstrømmene gennem søsystemet for given tapningspolitik, pumpepolitik og udledningspolitik, idet vandbalancen for søerne opstilles for hver enkelt dag med hensyntagen til pumpningen mellem søerne, aftapningen, udledningen, indstrømningen, fordampningen og nedbøren på den pågældende dag samt vandindholdet i søerne den foregående dag.

Indstrømningen til hver af de to søer simuleres med NAM for hele perioden 1950-75, hvor nedbørs-, temperatur- og fordampningsdata haves. Som parametre benyttes de i tabel 2.4.1 angivne værdier for Frøsmose Å og for Vigersdal Å med hensyntagen til grundvandsindvinding. På baggrund af de således fremkomne 26 års indstrømningsserier beregnes konsekvenserne af de forskellige tapningspolitikker (A: 15 mill. m^3/år, B: 12.5 mill. m^3/år, C: 10 mill. m^3/år, D: 7.5 mill. m^3/år) og de forskellige udledningspolitikker (I, II, III) på kote- og udledningsforhold.

Nogle hovedresultater er angivet i tabellerne 6.7.2, 6.7.3 og 6.7.4, hvor følgende parametre er angivet:

gns TAP = gennemsnitlig indvundet vandmængde

min TAP = mindste indvundet vandmængde inden for et kalenderår

gns LTØR = gennemsnitlig længde af uafbrudt periode, hvor udledningen til Ringsted Å er den minimalt tilladte, 170 l/s

max LTØR = længste uafbrudte periode med udledning på 170 l/s

min KOTE = differencen mellem de mindste koter i de 26 år og de mindste tilladte koter i Haraldsted og Gyrstinge Søer på henholdsvis 21.00 og 21.60. Det skal bemærkes, at de største tilladte koter på 23.50 henholdsvis 24.50 opnås adskillige gange i samtlige beregningseksempler

Udledningspolitik I

Tapningspolitik	gns TAP (mill.m^3/år)	min TAP (mill.m^3/år)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE (m)	KOTEBRUD p (%)	KOTEBRUD gns L (dage)	KOTEBRUD max L (dage)
A (15 mill.m^3/år)	14.3	9.1	321	686	-0.4	35	44	139
B (12.5 mill.m^3/år)	12.2	9.1	290	671	-0.2	15	46	90
C (10 mill.m^3/år)	10.0	9.2	256	667	-0.1	8	4	6
D (7.5 mill.m^3/år)	7.5	7.5	234	630	0.4	0	0	0

Tabel 6.7.2 Simuleringsresultater. Haraldsted-Gyrstinge Søer med vandindvinding.

Udledningspolitik II

Tapningspolitik	gns TAP (mill.m^3/år)	min TAP (mill.m^3/år)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE (m)	KOTEBRUD p (%)	KOTEBRUD gns L (dage)	KOTEBRUD max L (dage)
A	12.9	6.5	185	248	-0.6	54	90	203
B	11.6	6.3	181	244	-0.5	46	51	174
C	9.8	6.0	175	240	-0.4	15	53	137
D	7.4	5.6	165	185	-0.2	12	26	73

Tabel 6.7.3 Simuleringsresultater. Haraldsted-Gyrstinge Søer med vandindvinding.

Udledningspolitik III

Tapningspolitik	gns TAP (mill.m^3/år)	min TAP (mill.m^3/år)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE (m)	KOTEBRUD p (%)	KOTEBRUD gns L (dage)	KOTEBRUD max L (dage)
A	9.6	3.2	175	319	-1.3	81	151	280
B	8.5	3.3	167	305	-1.0	77	134	262
C	7.7	3.1	161	290	-0.7	54	128	238
D	6.2	2.7	144	249	-0.6	54	103	210

Tabel 6.7.4 Simuleringsresultater. Haraldsted-Gyrstinge Søer med vandindvinding.

KOTEBRUD p = hyppigheden af overskridelse af kotekrav. Antallet af kalenderår hvor minimumskoterne er mindre end de mindst tilladte divideret med 26

KOTEBRUD gns L = gennemsnitligt antal dage med kotebrud inden for de år, hvor kotebrud forekommer

KOTEBRUD max L = største antal dage med kotebrud inden for et kalenderår.

De i tabellerne 6.7.2, 6.7.3 og 6.7.4 anførte resultater stammer alle fra konsekvensberegninger for 26 års perioden 1950-75. Såfremt man ønsker oplysning om de fremtidige konsekvenser af alternative reservoirpolitikker, kan det som omtalt i kapitel 7 bedst ske ved at benytte stokastiske modeller for indstrømningerne til søerne til at generere flere mulige fremtidige indstrømningsforløb og herefter gennemføre konsekvensberegninger for disse. Et eksempel på opstilling og anvendelse af en stokastisk model er givet i afsnit 7.4. Selv om de i tabellerne 6.7.2, 6.7.3 og 6.7.4 anførte resultater således er behæftet med en større usikkerhed, når det gælder fremtidige forhold, end resultater, som fremkommer ved anvendelse af en stokastisk model, kan de dog give et udmærket størrelsesordensoverslag. Herudfra kan følgende hovedkonklusioner drages:

a. Udledningspolitik I vil, set fra et vandforsyningssynspunkt, være at foretrække frem for II og III. Tilsvarende giver I mindre sandsynlighed for kotebrud og mindre vandspejlsvariationer end II og III. Derimod giver udledningspolitik II anledning til de korteste uafbrudte perioder med minimumsvandføring (170 l/s) i Ringsted Å, hvilket set fra et vandløbskvalitetssynspunkt må være at foretrække.

b. For alle de 3 undersøgte udledningspolitikker er min TAP ca. lige stor ved tapningspolitikkerne A, B og C. Det vil med andre ord sige, at på grund af overskridelse af kotekravene vil den mulige vandindvinding inden for det tørreste af de 26 år være uafhængig af den daglige aftapning (A: 475 l/s, B: 396 l/s, C: 318 l/s).

c. Såfremt man forsøger at udnytte indvindingsretten på 15 mill. m^3/år og samtidig kun lige overholder udledningskravet på 170 l/s til Ringsted Å, er man i en situation svarende til kombinationen I, A. Denne kombination vil, jfr. tabel 6.7.2,

medføre brud på minimumskotekriteriet i gennemsnit hvert 3. år med en gennemsnitlig overskridelsesperiode på 1½ måned. Desuden vil der med en middeltidsafstand på 26 år være situationer med en uafbrudt underskridelse af minimumskoterne i 4-5 mdr. samtidig med, at det kun er muligt at indvinde ca. 9 mill m^3/år og samtidig med, at der i sammenhængende perioder på næsten 2 år ad gangen kun udledes 170 l/s til Ringsted Å.

Et kig på de beregninger, der ligger bag resultaterne i tabellerne 6.7.2, 6.7.3 og 6.7.4, viser, at de kritiske situationer med kotebrud, manglende tappemulighed m.v. ikke er forårsaget af et enkelt særligt tørt år, men derimod af flere på hinanden efterfølgende år med en lille afstrømning, således at magasinerne ikke når at blive fyldt op hver vinter. Derfor vil det være muligt at forøge vandindvindingsmulighederne, mindske hyppigheden af brud på minimumskotekriteriet og samtidig afkorte de lange perioder med minimumsudledning til Ringsted Å ved at fylde magasinerne op hver vinter. Det kan lade sig gøre ved i nogle vandrige måneder at pumpe vand de ca. 10 km fra Tystrup Sø til Frøsmose Å. Beregninger over, hvilke konsekvenser en sådan oppumpning ville have på forholdene i Tystrup-Bavelse Sø, samt hvilke forbedringer den ville give anledning til i Haraldsted-Gyrstinge Sø, er udført i afsnit 7.5.

7. INDVINDING AF OVERFLADEVAND FRA RESERVOIRER LANGS SUSÅENS NEDRE LØB

7.1. Indledning

Vandløbsafstrømningen ved Suså, Holløse Mølle, er for perioden 1961-75 målt til gennemsnitlig 176 mill. m^3/år. En del af denne afstrømning er tilkendt Københavns Vandforsyning som indvindingsret knyttet til Haraldsted og Gyrstinge Søer (jfr. kapitel 6). Det vil imidlertid være muligt at indvinde yderligere vandmængder enten som overfladevand eller som en forøget grundvandsindvinding via en nedpumpning af overfladevand til grundvandsmagasinet (jfr. kapitel 5).

I forbindelse med såvel overfladevandsindvinding som nedpumpning af overfladevand til grundvandsmagasinet vil det være nødvendigt med et eller flere reservoirer til udjævning af den kraftige årstidsvariation i afstrømningen. Tystrup-Bavelse Sø er det eneste naturlige reservoir, der kan anvendes. Herudover kunne reguleringsmagasinets volumen tænkes øget ved at anlægge en eller flere kunstige søer på passende steder langs Susåen.

I forbindelse med en undersøgelse af f.eks. en påtænkt overfladevandsindvindings fremtidige funktionsområde ville det være af betydning, om den fremtidige naturlige tilstrømning til det benyttede reguleringsmagasin var kendt. Med en på forhånd fastlagt driftmåde af vandforsyningsanlægget (vandindtaget) ville det på grundlag heraf være muligt at forudberegne de resulterende hydrologiske konsekvenser i form af vandspejlsvariationer i magasinet samt det tidslige forløb og omfang af afløbet fra magasinet. Inden for anlæggets påregnede levetid ville det således være muligt med sikkerhed at udtale sig om f.eks., hvor mange gange søvandspejlet kommer under eller over eventuelle kritiske niveauer eller f.eks., hvor mange gange afløbet fra søen underskrider en bestemt værdi.

Nu er det imidlertid ikke muligt at forudsige den naturlige tilstrømning. Hvad vi kan slutte af de fremtidige tilstrømninger må baseres på visse antagelser om tidslig homogenitet i kombination med det indsamlede erfaringsmateriale i form af eksisterende hydrologisk datamateriale inden for afstrømningsoplandet, kendskab

til eventuelt ændrede afstrømningsforhold som følge af menneskelige indgreb samt hydrologiske beregningsredskaber. Dette erfaringsmateriale er nærmere beskrevet i afsnit 7.2. På dette grundlag kan opbygges en stokastisk model for tilstrømningen, hvilket er beskrevet i afsnit 7.4. Parametrene i den stokastiske model estimeres på grundlag af de foreliggende historiske afstrømningsdata. Under anvendelse af EDB er det herefter en simpel sag ved hjælp af den stokastiske model at generere et vilkårligt antal mulige fremtidige afstrømningsforløb. Gennemføres herefter konsekvensberegninger med disse syntetiske afstrømninger, lader det sig gøre at beregne sandsynligheden for, at søvandspejlet falder under et kritisk niveau, eller at afløbet fra søen underskrider en bestemt værdi inden for et givet tidsrum.

På basis af en opstillet vandbalancemodel for Tystrup-Bavelse Sø, jfr. afsnit 7.3, og simulerede tilstrømninger er der gennemført beregninger af de hydrologiske konsekvenser (vandstandsvariationer, afløbsvariationer) af alternative kombinationer af overfladevandsindvinding, nedpumpning af vand til grundvandsmagasinet og oppumpning af vand til Frøsmose Å. Resultaterne heraf er anført og diskuteret i afsnit 7.5.

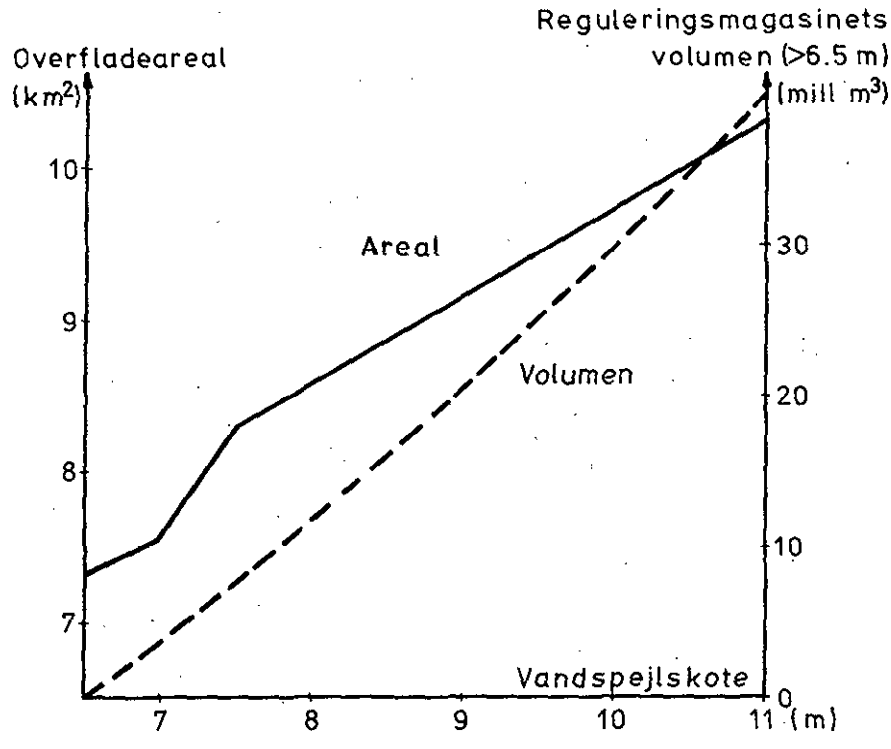
7.2. Hydrologisk beskrivelse

7.2.1. Tystrup-Bavelse Sø

Tystrup-Bavelse Sø er et søkompleks beliggende ca. 6 km syd for Sorø og ca. 14 km nordvest for Næstved. Søen, som ligger i en subglacial dal, er delt i tre bassiner af tærskler ca. 2 m under middelvandspejlet (kote 7 m). Søens samlede areal er knap 8 km^2. Tilløbet til søen finder hovedsageligt sted i den nordlige ende af Tystrup Sø, hvor Susåen udmunder, og gennem Torpekanalen, der har indløb i Bavelse Sø. Desuden er der tilløb fra nogle mindre bække. Afløb finder udelukkende sted gennem Susåens nedre løb. Afstrømningsoplandet er ved Susåens udløb fra søen på 730 km^2.

Ud fra et målebordsblad er søens areal målt som funktion af vandspejlskoten. Heraf er udledt den på figur 7.2.1 angivne sammenhæng mellem vandspejlskote, overfladeareal og magasineringsvolumen, forudsat at den mindste tilladelige vandspejlskote er på 6.50 m.

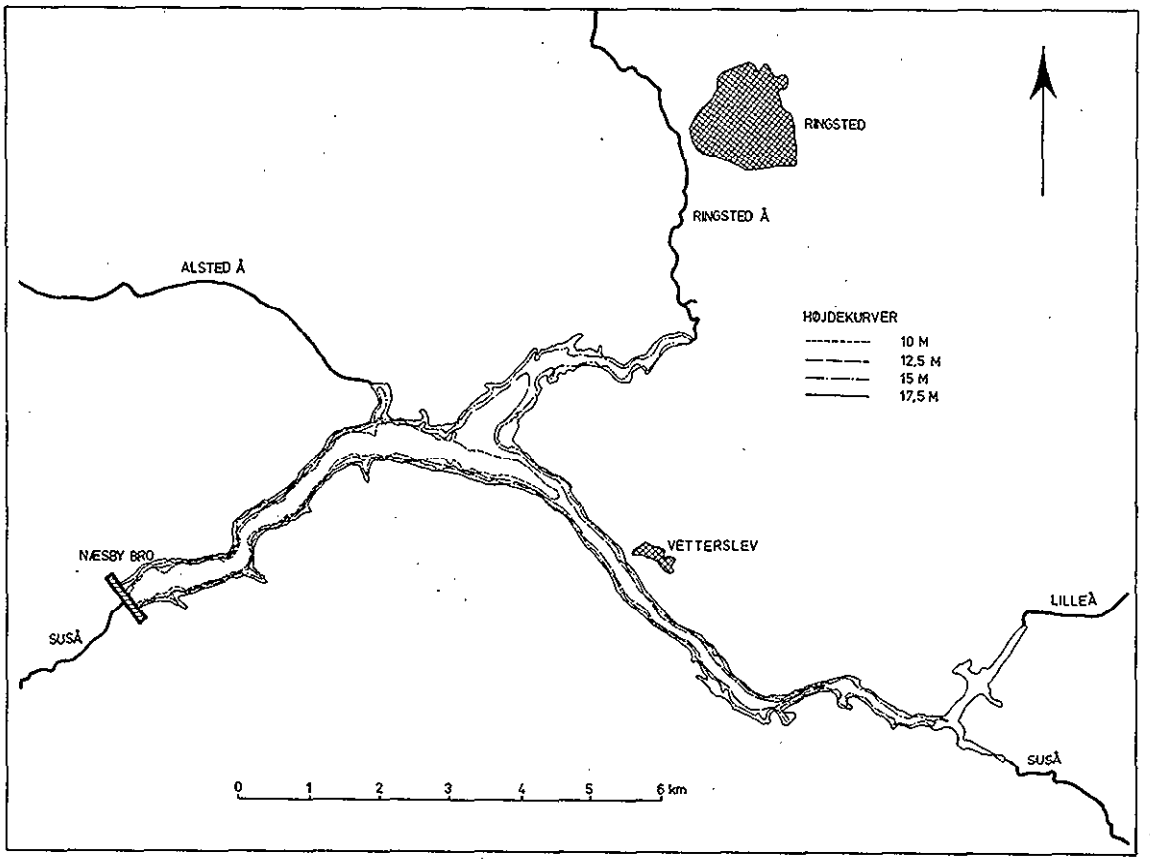
Søen og dens omgivelser er fredet bl.a. ved overfredningsnævnets kendelse af 20.4.1964. I denne er indføjet en klausul, der åbner mulighed for benyttelse til vandforsyningsreservoir.



Figur 7.2.1 Kote-areal-volumen sammenhæng for reguleringsmagasinet i Tystrup-Bavelse Sø, forudsat at den mindste tilladte vandspejlskote er 6.50 m.

7.2.2. Kunstige søer langs Susåen

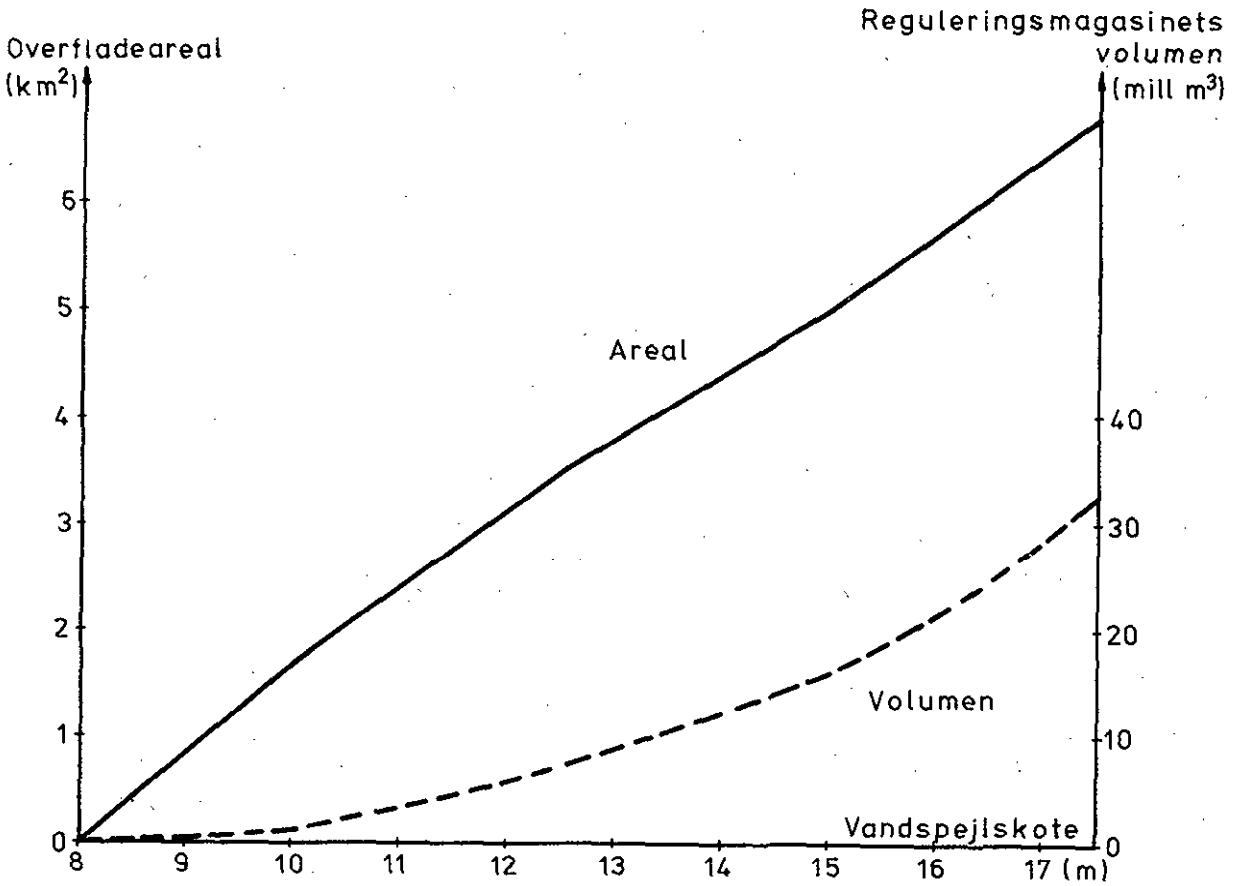
Såfremt reguleringsmagasinets volumen ønskes forøget ud over, hvad der kan opmagasineres i Tystrup-Bavelse Sø, er det teoretisk muligt at anlægge en eller flere kunstige søer på passende steder langs Susåen. Eftersom Susådalen både er smal og dyb, får en kunstig sø en meget langstrakt form, ligesom det bliver nødvendigt med vandspejlsvariationer på flere meter, hvis reguleringsmagasinet skal have en betragtelig størrelse. Eksempelvis vil en kunstig sø skabt af en dæmning ved Næsby Bro få den på figur 7.2.2 viste udstrækning og have de på figur 7.2.3 viste overfladearealer og voluminer, som funktion af den maksimalt tilladelige vandspejlskote.



Figur 7.2.2 Udstrækningen af en kunstig sø i Susådalen opstrøms for Næsby Bro.

Et magasin på eksempelvis 30 mill. m^3 kan således fremskaffes på flere måder, f.eks. i Tystrup-Bavelse Sø med en tilladelig variation i vandspejlskoter på mellem 6.5 m og 10 m, eller f.eks. i Tystrup-Bavelse Sø med en tilladelig variation i vandspejlskoter på mellem 6.5 m og 8 m suppleret med en kunstig sø som beskrevet på figurerne 7.2.2 og 7.2.3 med en tilladelig kotevariation på mellem 8 m og 15 m. Eftersom såvel de to magasiner som indstrømningen til dem er lige store, vil vandindvindingsmulighederne fra de to forskellige magasiner være lige gode. Det kan dog forekomme urealistisk med en kunstig sø, hvor der tillades en variation i overfladearealet på 5 km^2 og i vandspejlskoten på 7 m.

Beregningerne i de følgende afsnit er foretaget, som om hele reguleringsmagasinet er placeret i Tystrup-Bavelse Sø. Hovedresulta-terne ændres imidlertid ikke, såfremt noget af magasinet består af kunstige søer, og resten ligger i Tystrup-Bavelse Sø.



Figur 7.2.3 Kote-areal-volumen forhold for en kunstig sø anlagt i Susådalen opstrøms for Næsby Bro som skitseret på figur 7.2.2.

7.2.3. Indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø

Det hydrologiske datamateriale, som i det væsentlige skal ligge til grund for bestemmelsen af indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø, er nævnt i afsnit 2.4.1. Det bemærkes her, at der eksisterer vandføringsobservationer for Suså, Næsby Bro (opland: 589 km²) og Suså, Holløse Mølle (opland: 753 km²), som er beliggende henholdsvis umiddelbart opstrøms og umiddelbart nedstrøms for Tystrup-Bavelse Sø. Disse vandføringsobservationer stammer imidlertid til dels fra en periode, hvor der ikke var foretaget de samme menneskelige indgreb i det hydrologiske kredsløb, som tilfældet er i dag. Inden for Ringsted Å's opland er der således både foretaget en overfladevandsindvinding og en grundvandsindvinding (jfr. kapitel 6) samtidig med, at vandføringen i Ringsted Å er blevet reguleret kraftigt i forbindelse med anvendelsen af Haraldsted og Gyrstinge Søer til reguleringsmagasiner for overfladevandsindvinding.

Såfremt der ønskes en indstrømningsserie til Tystrup-Bavelse Sø, hvor der tages hensyn til vandindvindingen og reguleringen i forbindelse med Haraldsted-Gyrstinge Sø, kan de eksisterende vandføringsobservationer altså ikke uden videre anvendes.

Derfor er afstrømningsoplandet til Tystrup-Bavelse Sø ved fremskaffelsen af en indstrømningsserie blevet delt i to deloplande. Det ene delopland består af Haraldsted-Gyrstinge oplandet på 170 km^2, hvor udstrømningen til Ringsted Å kan simuleres med den i kapitel 6 omtalte EDB model, når reservoirpolitikken for Haraldsted-Gyrstinge Sø er givet. Det er således muligt at se, hvordan forskellige reservoirpolitikker ved Haraldsted-Gyrstinge Sø kan påvirke indvindingsmulighederne ved Tystrup-Bavelse Sø. Det andet delopland er de resterende 560 km^2, hvoraf Suså, Vetterslev oplandet andrager 256 km^2. Afstrømningen herfra er simuleret ved hjælp af den i kapitel 2 omtalte Nedbør-Afstrømnings-Model (NAM). Som modelparametre er med undtagelse af Q_{BF}, Q_{SPV} og C_{AREAL} anvendt de i tabel 2.4.1 angivne parametre for Suså, Vetterslev. I overensstemmelse med tabel 1.5.4 er benyttet Q_{BF} = 245 l/s. Endvidere er benyttet Q_{SPV} = 105 l/s svarende til spildevandsudledningerne opstrøms for Vetterslev plus spildevandstilskuddene fra Ringsted og Sorø. Idet der i overensstemmelse med den i kapitel 1 omtalte grundvandsmodel ikke regnes med nogen infiltration eller lækage uden for Haslev og Regnemark, er C_{AREAL} ved en vægtning efter areal fundet til

$$C_{AREAL} = \frac{0.83 \cdot 256 \text{ km}^2 + 1.00 \cdot 304 \text{ km}^2}{560 \text{ km}^2} = 0.92$$

Der er herefter simuleret en indstrømningsserie til Tystrup-Bavelse Sø for 26 års perioden 1950-75 ved at summere afstrømningen fra de to deloplande og hertil addere nedbør-fordampning på søoverfladen. Som en grov kontrol på de simulerede værdier er der for perioden 1961-69 foretaget en sammenligning på årsbasis mellem den specifikke afstrømning (l/s/km^2), som er simuleret af NAM for de 560 km^2, og den, som er observeret ved Holløse Mølle. En lineær regression mellem de to talsæt gav en korrelationskoefficient på 0.99, hvilket må betegnes som udmærket.

For at se hvordan forskellige reservoirpolitikker ved Haraldsted-Gyrstinge Sø kan påvirke indvindingsmulighederne ved Tystrup-

Bavelse Sø, er der simuleret 3 forskellige indstrømningsserier TBIND1, TBIND2 og TBIND3 til Tystrup-Bavelse Sø, svarende til 3 forskellige reservoirpolitikker ved Haraldsted-Gyrstinge Sø. Afstrømningen fra det 560 km^2 opland, som er beliggende uden for Haraldsted-Gyrstinge oplandet, er ens i de 3 afstrømningsserier, således at forskellen mellem TBIND1, TBIND2 og TBIND3 udelukkende hidrører fra variationer i afstrømningen fra det 170 km^2 Haraldsted-Gyrstinge opland.

TBIND1: Her forudsættes en daglig tapning fra Haraldsted Sø på 475 l/s ~ 15 mill. m^3/år, en minimumsudledning til Ringsted Å på 170 l/s (udledningspolitik I) og i øvrigt en reservoirpolitik som beskrevet i afsnit 6.7.2. Denne kombination, som i afsnit 6.7 er benævnt I,A, svarer til, at vandindvindingsretten på 15 mill. m^3/år forsøges udnyttet, samtidig med at udledningskravet på 170 l/s til Ringsted Å lige netop overholdes.

TBIND2: Her forudsættes tapningspolitik og udledningspolitik som ved TBIND1, d.v.s. kombinationen I,A. Men derudover forudsættes en overførsel af vand fra Tystrup-Bavelse Sø til Frøsmose Å i 5 måneder fra december til april på 0.766 m^3/s, svarende til 10 mill. m^3/år. Som følge af denne oppumpning af vand til Frøsmose Å (Gyrstinge Sø) er den i afsnit 6.7.2 anvendte pumpepolitik mellem Haraldsted og Gyrstinge Søerne ændret lidt. Formålet med at foretage beregninger med denne indstrømningsserie er at se, hvilke hydrologiske konsekvenser en sådan overførsel af vand har på såvel Haraldsted-Gyrstinge Sø som Tystrup-Bavelse Sø.

TBIND3: Her forudsættes en daglig tapning fra Haraldsted Sø på 158 l/s ~ 5 mill. m^3/år, en minimumsudledning til Ringsted Å på 500 l/s og ligesom ved TBIND2 en overførsel af vand fra Tystrup-Bavelse Sø til Frøsmose Å på 10 mill.m^3/år. Ved en sådan reservoirpolitik fås en forholdsvis lille vandindvinding direkte fra Haraldsted-Gyrstinge Sø, men til gengæld en stor minimumsvandføring i Ringsted Å, hvilket kan forbedre recipientforholdene i Ringsted Å og/eller billiggøre spildevandsrensningen fra Ringsted. Derudover kan det vand, der udledes til Ringsted Å, set ud fra et vandforsyningssynspunkt ikke betragtes som

spildt, hvis der samtidig foretages vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø, idet vandet opsamles her og muliggør en tilsvarende større vandindvinding herfra.

7.3. Reservoirpolitik og vandbalancemodel for Tystrup-Bavelse Sø

For at sikre en optimal udnyttelse af vandressourcerne i overensstemmelse med nogle af samfundet opstillede målsætninger, er det, som omtalt i afsnit 6.7.2, nødvendigt at have en reservoirpolitik, som fortæller, hvordan man i givne situationer benytter de reguleringsmuligheder, et reservoir giver. Som elementer i en reservoirpolitik indgår bl.a. koteforhold, udledningsforhold og tapningsforhold. I beregningseksemplerne i afsnittene 7.4.2 og 7.5 er følgende størrelser anvendt:

HMIN = den mindste tilladte vandspejlskote i søen. HMIN er i alle beregningseksemplerne sat til 6.50 m.

HMAX = den største tilladte vandspejlskote i søen. Som HMAX er anvendt 8.00 m og 10.00 m svarende til et reguleringsmagasin på henholdsvis 11.9 mill. m^3 og 30.0 mill. m^3.

TAPMAX = aftapning af vand fra søen til vandindvinding.

OPPUMP = overførsel af vand fra søen til enten Frøsmose Å (Gyrstinge Sø) eller til nedpumpning til grundvandsmagasinet (jfr. kapitel 5). Denne oppumpning foretages kun i de 5 måneder december-april.

QMIN = den mindste krævede udledning af vand fra søen til Susåens nedre løb. Der er i de efterfølgende beregningseksempler kun anvendt QMIN = 0.500 m^3/s.

Til beregning af en vandindvindings konsekvenser på vandspejlsforhold i søen og afstrømningsforhold fra søen er der opbygget en simpel EDB model. Denne model beregner ud fra vandbalancebetragtninger vandspejlskote og afstrømning fra søen for hver enkelt dag, når indstrømningen og reservoirpolitikken er givet. Den i alle de følgende beregningseksempler anvendte reservoirpolitik er som følger:

1. Der foretages i de 5 måneder december-april altid en oppumpning af størrelsen OPPUMP.

2.a. Såfremt søens vandspejlskote er mindre end HMIN, foretages der ingen vandindvinding. Der udledes vandføringen QMIN til Susåens nedre løb.

2.b. Såfremt søens vandspejlskote er beliggende mellem HMIN og HMAX, bliver der foretaget en vandindvinding TAPMAX og en vandudledning QMIN.

2.c. Såfremt søens vandspejlskote er lig HMAX, er reguleringsmagasinet fyldt op. Der foretages i dette tilfælde den normale vandindvinding TAPMAX. En eventuel overskydende vandmængde "løber over", således at afstrømningen fra søen bliver større end QMIN.

Som hovedresultater for de i afsnit 7.4.2 og 7.5 nævnte beregningseksempler er der ligesom i afsnit 6.7.3 udregnet følgende faktorer:

gns TAP	=	gennemsnitlig indvundet vandmængde
min TAP	=	mindste indvundet vandmængde inden for et kalenderår
gns LTØR	=	gennemsnitlig længde af uafbrudt periode, hvor udledningen til Susåens nedre løb er QMIN
max LTØR	=	længste uafbrudte periode med udledning på QMIN
min KOTE	=	laveste vandspejlskote minus den lavest tilladte vandspejlskote (HMIN). Det bemærkes, at den højest tilladte vandspejlskote HMAX nås adskillige gange ved alle beregningseksemplerne, således at den største vandspejlsvariation kan findes som HMAX - (HMIN - min KOTE)
KOTEBRUD p	=	hyppigheden af kotebrud. Antal kalenderår, hvor den mindste vandspejlskote er mindre end HMIN, divideret med antallet af år, som beregningseksemplet omfatter
KOTEBRUD gns L	=	gennemsnitligt antal dage med kotebrud inden for de år, hvor kotebrud forekommer
KOTEBRUD max L	=	største antal dage med kotebrud inden for et kalenderår.

7.4. Stokastisk model for indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø

7.4.1. Opbygning af en stokastisk model

Som datagrundlag for opbygningen af en stokastisk model for indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø er benyttet den i afsnit 7.2.3 omtalte 26 års indstrømningsserie TBIND1, der i det følgende be-

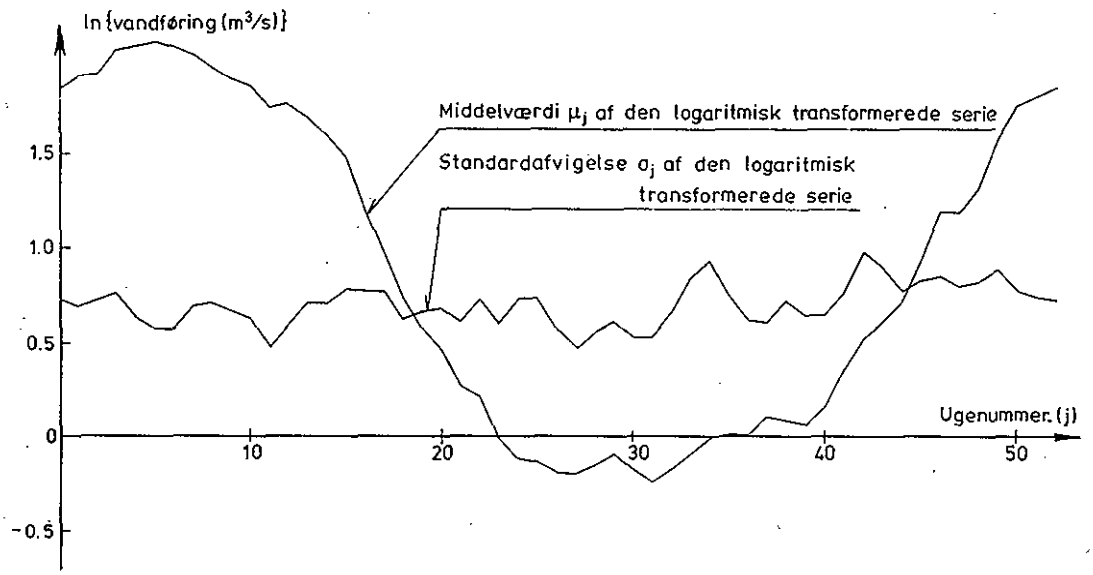
nævnes som den historiske serie X_t. Som tidsskridt i den stokastiske model er anvendt 1 uge.

For at forbedre den stokastiske models simulering af de små vandføringer, som er specielt vigtige i denne sammenhæng, har det været nødvendigt at foretage en logaritmisk transformation $Y_t = \ln\{X_t\}$. Der er herefter foretaget en sædvanlig tidsserieanalyse af Y_t, se f.eks. [14]. Herved fandtes Y_t-serien at kunne beskrives ved en lineær 1. ordens autoregressiv proces

$$Y_{i+1} = \mu_{j+1} + r \frac{\sigma_{j+1}}{\sigma_j} (Y_i - \sigma_j) + \sigma_{j+1} \sqrt{1 - r^2} \cdot Z_{i+1}$$

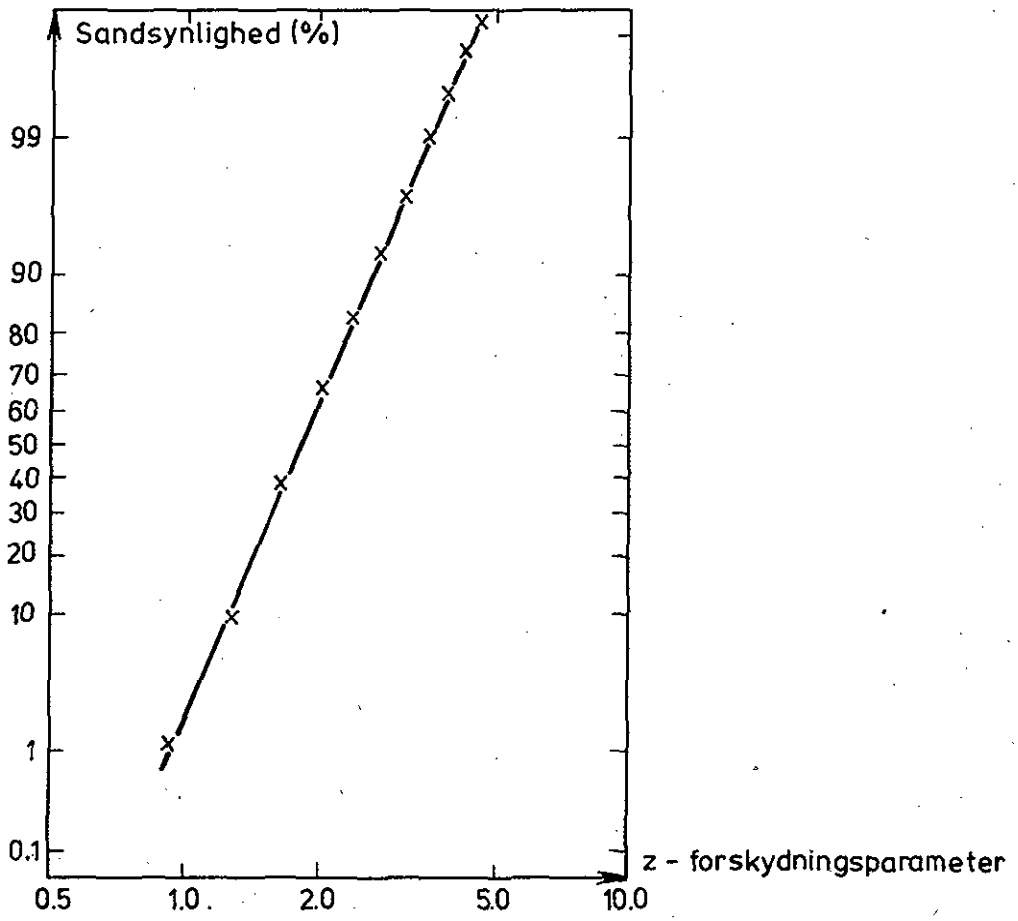
Y_i er logaritmen af indstrømningen i den i'te uge, Z_i er en følge af indbyrdes uafhængige, ensfordelte stokastiske variable med middelværdi 0 og standardafvigelse 1. Indexet j løber cyklisk fra 1 til 52, hvorved der tages hensyn til den sæsonmæssige variation i middelværdien μ_j og standardafvigelsen σ_j for de enkelte uger i året. Indexet i løber sekventielt fra nul til det ønskede antal ugeværdier. r er korrelationskoefficienten mellem to nabouger.

Parametrene μ_j, σ_j og r samt fordelingen af den stokastiske variable Z estimeres ud fra den historiske serie. Estimaterne for μ_j og σ_j er afbildet på figur 7.4.1.



Figur 7.4.1 Middelværdi μ_j og standardafvigelse σ_j for den logaritmisk transformerede vandføringsserie.

Korrelationskoefficienten r er estimeret til 0.83. På figur 7.4.2 er fordelingen af den stokastiske variable Z plottet på logaritmisk normalfordelingssandsynlighedspapir, hvoraf det fremgår, at Z kan antages at følge en 3-parameter logaritmisk normalfordeling.



Figur 7.4.2 Plotning af den stokastiske variable Z på logaritmisk normalfordelingspapir.

Hypotesen om, at den historiske serie kan antages at være et udfald af en lineær 1. ordens autoregressiv proces, er efterprøvet ved hjælp af statistiske tests. Disse tests har vist, at hypotesen ikke kan afvises, men at det dog på mange områder ville have været ønskeligt med en bedre tilpasning af modellen.

Genereringen af syntetiske afstrømningsserier foregår herefter ved på regnemaskine at generere Z_i'erne, hvorefter Y_i'erne beregnes. Endelig foretages tilbagetransformationen $X_t = \exp\{Y_t\}$.

Ovennævnte stokastiske model må siges at være mangelfuld på en del områder. Såfremt konsekvensberegninger på grundlag af synte-

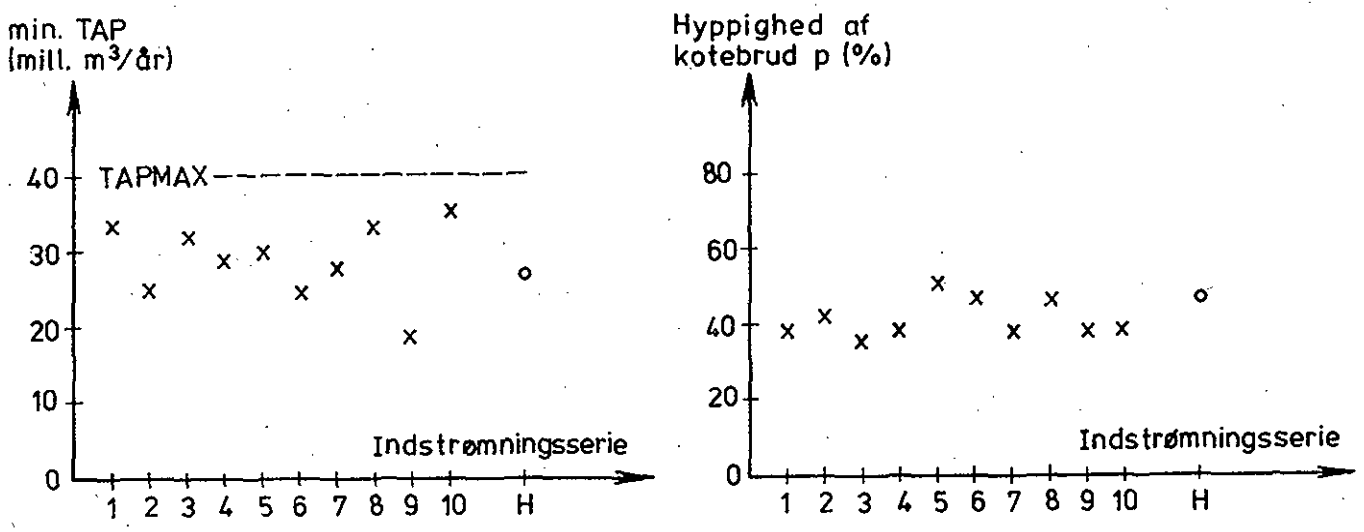
tiske vandføringsserier genereret med den stokastiske model skal udgøre et beslutningsgrundlag vedrørende etablering af vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø, kan og bør modellen forbedres en del. Hovedformålet med en stokastisk model er i nærværende undersøgelse først og fremmest at illustrere, hvad en stokastisk model kan benyttes til. Til dette formål må ovenstående model siges at være af tilfredsstillende kvalitet. Derudover bliver der mulighed for at gå mere i dybden med opstilling og anvendelse af stokastiske modeller i forbindelse med det hydrologiske forskningsprojekt, "Susåprojektet", som efter planen skal foregå i tidsrummet 1977-82.

7.4.2. Anvendelse af den stokastiske model

Ved hjælp af en stokastisk model er det muligt at generere et vilkårligt antal mulige fremtidige afstrømningsforløb. Ved at benytte disse syntetiske serier som indstrømningsdata til den i afsnit 7.3 omtalte vandbalancemodel for Tystrup-Bavelse Sø kan man få oplysning om usikkerheden på de beregnede konsekvenser (kotebrudssandsynlighed, tappemulighed m.v.). Til illustration heraf er der genereret 10 forskellige 26 års vandføringsserier. For hver af disse serier er der for en enkelt kombination af HMAX, TAPMAX og OPPUMP udregnet hyppigheden af kotebrud, KOTEBRUD p og den mindst mulige vandindvinding pr. år blandt de 26 år, min TAP. Resultaterne heraf er plottet på figur 7.4.3, hvor en tilsvarende beregning for den historiske serie er vist til sammenligning. Som det fremgår af figuren, er der en ikke ubetydelig variation fra den ene 26 års serie til den anden. Heraf kan man slutte, at man skal være forsigtig med at drage væsentlige konklusioner på baggrund af et enkelt hændelsesforløb som f.eks. en observeret serie, samt at man kan forbedre beslutningsgrundlaget ved at gennemregne flere mulige hændelsesforløb, som er simuleret med en stokastisk model.

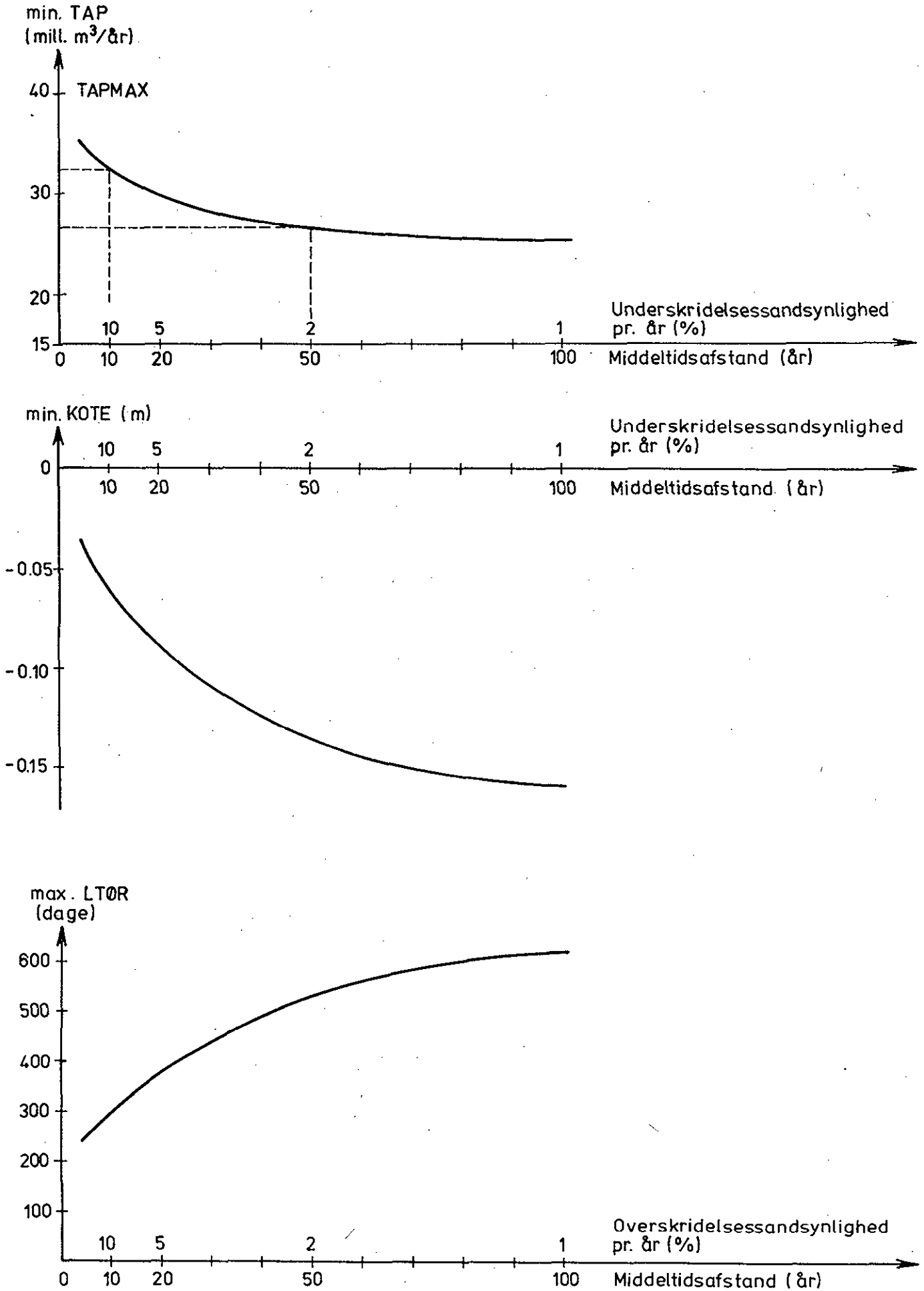
Ligeledes kan man ved hjælp af den stokastiske model beregne middeltidsafstande og over/underskridelsessandsynligheder for forskellige hændelser. Til illustration heraf er der genereret 10 forskellige vandføringsserier for hver af længderne 5, 10, 26, 50 og 100 år. For en enkelt kombination af HMAX, TAPMAX og OPPUMP (8.00 m, 40 mill. m^3/år, 10 mill. m^3/år) er faktorerne min TAP, min KOTE og max LTØR beregnet, og herudfra er de på figur 7.4.4

viste kurver optegnet. Ud fra figur 7.4.4 kan man således f.eks. se, at min TAP ≦ 26.5 mill. m^3/år optræder med en middeltidsafstand på 50 år, svarende til at sandsynligheden, for at min TAP i et enkelt år underskrider 26.5 mill. m^3/år er $\frac{1}{50}$ = 2%. Tilsvarende ses at min TAP ≦ 32.5 mill. m^3/år optræder med en middeltidsafstand på 10 år, svarende til at sandsynligheden, for at min TAP i et enkelt år underskrider 32.5 mill. m^3/år er $\frac{1}{10}$ = 10%.



Figur 7.4.3 Resultater af konsekvensberegninger fra Tystrup-Bavelse Sø ved anvendelse af de genererede indstrømningsserier 1-10 og den historiske indstrømningsserie H. Forudsætningerne vedrørende reservoirpolitikken er HMAX = 8.00 m, TAPMAX = 40 mill. m^3/år og OPPUMP = 10 mill. m^3/år.

Figur 7.4.4.(p.142). Middelafstande og over/underskridelsessandsynligheder beregnet ved hjælp af den stokastiske model. Forudsætningerne vedrørende reservoirpolitikken er HMAX = 8.00 m, TAPMAX = 40 mill. m^3/år og OPPUMP 10 mill. m^3/år.



Figur 7.4.4 Tekst se p. 141.

7.5. Beregning af de hydrologiske konsekvenser af vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø

For at give eksempler på de hydrologiske konsekvenser af alternative kombinationer af vandindvinding, magasinstørrelse og overførsel af vand i vintermånederne til Frøsmose Å eller grundvandsmagasinet er der med den i afsnit 7.3 nævnte vandbalancemodel foretaget beregninger for de i afsnit 7.2.3 omtalte 3 forskellige indstrømningsserier TBIND1, TBIND2 og TBIND3. Disse beregninger er kun foretaget med de 3 "historiske" indstrømningsserier. Såfremt beregningerne skulle danne grundlag for en beslutning om etablering af vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø, ville det have været ønskeligt at udvide dem med opbygning af stokastiske modeller for indstrømningen og konsekvensberegninger på baggrund af genererede syntetiske afstrømningsserier, som antydet i afsnit 7.4.

De hydrologiske konsekvenser af de 3 forskellige reservoirpolitikker i Haraldsted-Gyrstinge Sø, som ligger til grund for de 3 forskellige indstrømningsserier til Tystrup-Bavelse Sø, er beregnet med den i afsnit 6.7 omtalte EDB-model og anført i tabel 7.5.1. Nogle hovedresultater af konsekvensberegningerne for Tystrup-Bavelse Sø er angivet i tabellerne 7.5.2, 7.5.3 og 7.5.4. Der er herudover vist nogle mere detaljerede resultater på figurerne 7.5.1 og 7.5.2.

Forudsætningerne for resultaterne på figurerne 7.5.1 og 7.5.2 er, at den maksimale vandspejlskote i Tystrup-Bavelse Sø er fastsat til HMAX = 8.00 m, og at minimumsudstrømningen fra søen er fastsat til 0.500 m^3/s. Herefter er for hver af de 3 indstrømningsserier angivet den mindste årlige aftappede vandmængde min TAP samt kotebrudshyppigheden p inden for de 26 år som funktion af den benyttede tapningspolitik TAPMAX. På figur 7.5.1 er der kun regnet med den ved TBIND2 og TBIND3 forudsatte pumpning på 10 mill. m^3/år fra Tystrup-Bavelse Sø til Frøsmose Å. På figur 7.5.2 forudsættes derudover en nedpumpning på 30 mill. m^3/år fra Tystrup-Bavelse Sø til grundvandsmagasinet, således at der i dette tilfælde ialt foretages følgende oppumpning fra Tystrup-Bavelse Sø

TBIND1: OPPUMP = 30 mill. m^3/år
TBIND2: OPPUMP = 40 mill. m^3/år
TBIND3: OPPUMP = 40 mill. m^3/år.

RESERVOIR-POLITIK	gns TAP ($mill.m^3/år$)	min TAP ($mill.m^3/år$)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE (m)	KOTEBRUD p (%)	KOTEBRUD gns L (dage)	KOTEBRUD max L (dage)
TBIND1	14.3	9.1	321	686	-0.4	35	44	139
TBIND2	14.9	13.3	242	334	-0.1	15	29	50
TBIND3	4.9	4.3	242	334	-0.1	15	23	48

Tabel 7.5.1 Konsekvensberegninger for Haraldsted-Gyrstinge Sø ved de 3 forskellige reservoirpolitikker, som ligger til grund for de 3 indstrømningsserier til Tystrup-Bavelse Sø.

Bemærk: Ved TBIND1 og TBIND2 betegner LTØR længden af en uafbrudt periode, hvor udledningen til Ringsted Å er 170 l/s. Ved TBIND3 betegner LTØR længden af en uafbrudt periode, hvor udledningen til Ringsted Å er 500 l/s.

Indstrømningsserie TBIND1

HMAX (m)	OPPUMP (mill. m^3/år)	TAPMAX (mill. m^3/år)	gns TAP (mill. m^3/år)	min TAP (mill. m^3/år)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE i forhold til 6.50 m (m)	KOTEBRUD p (%)	KOTEBRUD gns L (dage)	KOTEBRUD max L (dage)
8.00	0	20	20.0	20.0	146	276	0.15	0	0	0
8.00	0	40	38.4	28.7	208	298	-0.12	38	38	104
8.00	0	60	50.8	35.3	332	347	-0.17	89	64	150
8.00	10	20	20.0	19.9	154	294	-0.00	4	2	2
8.00	10	40	37.7	26.6	216	313	-0.12	46	46	122
8.00	10	60	49.3	30.4	241	374	-0.17	89	74	181
8.00	40	30	18.8	10.0	203	390	-1.25	27	80	182
8.00	40	40	32.7	12.4	258	536	-1.93	73	92	253
8.00	40	60	41.7	14.5	291	575	-1.98	92	121	278
10.00	0	20	20.0	20.0	146	276	2.35	0	0	0
10.00	0	40	40.0	40.0	210	309	0.93	0	0	0
10.00	0	60	59.5	53.6	247	358	-0.02	12	26	39
10.00	10	20	20.0	20.0	154	294	2.22	0	0	0
10.00	10	40	40.0	40.0	219	325	0.67	0	0	0
10.00	10	60	58.9	48.6	284	657	-0.06	19	37	69
10.00	40	20	20.0	20.0	218	652	0.03	0	0	0
10.00	40	40	38.8	29.5	315	693	-1.03	19	60	98
10.00	40	60	51.4	32.9	417	1001	-1.96	65	81	166

Tabel 7.5.2 Konsekvensberegninger af de hydrologiske konsekvenser af en vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø for perioden 1950-75. De anvendte betegnelser er forklaret i afsnit 7.3.

Indstrømningsserie TBIND2

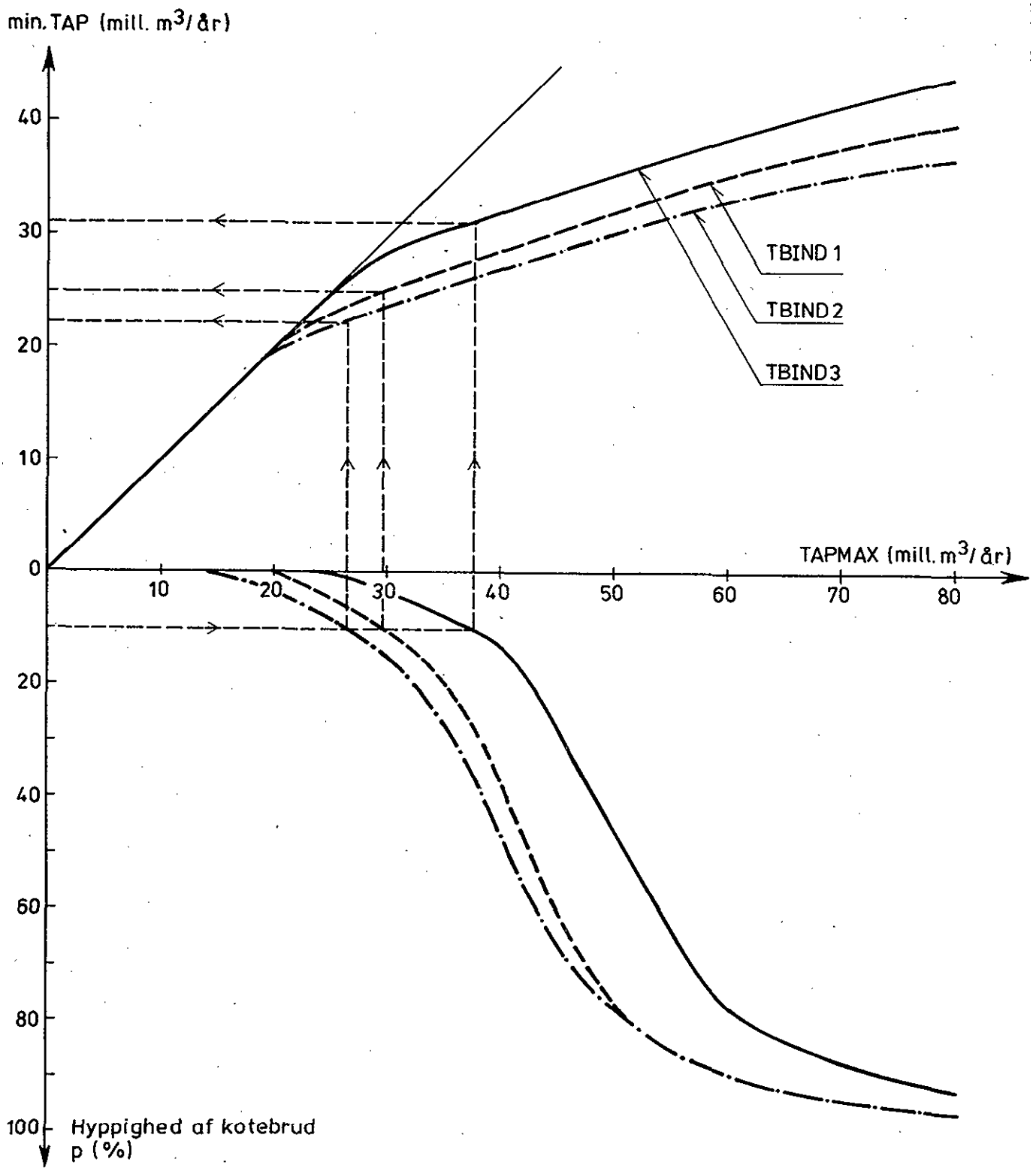
HMAX (m)	OPPUMP (mill. m^3/år)	TAPMAX (mill. m^3/år)	gns TAP (mill. m^3/år)	min TAP (mill. m^3/år)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE i forhold til 6.50 m (m)	KOTEBRUD p (%)	KOTEBRUD gns L (dage)	KOTEBRUD max L (dage)
8.00	10	20	20.0	19.9	153	294	-0.00	4	2	2
8.00	10	40	37.9	27.0	214	307	-0.12	46	42	119
8.00	10	60	49.8	33.2	235	350	-0.17	89	70	163
8.00	40	20	19.3	14.0	196	384	-1.25	19	72	110
8.00	40	40	33.9	16.5	242	389	-1.92	73	76	216
8.00	40	60	43.6	18.9	265	574	-1.98	92	109	250
10.00	10	20	20.0	20.0	153	294	2.22	0	0	0
10.00	10	40	40.0	40.0	215	315	0.71	0	0	0
10.00	10	60	59.1	51.4	251	362	-0.05	19	30	53
10.00	40	20	20.0	20.0	206	632	0.56	0	0	0
10.00	40	40	39.2	33.1	289	672	-1.03	15	48	64
10.00	40	60	54.1	37.0	361	938	-1.94	62	59	141

Tabel 7.5.3 Konsekvensberegninger af de hydrologiske konsekvenser af en vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø for perioden 1950-75. De anvendte betegnelser er forklaret i afsnit 7.3.

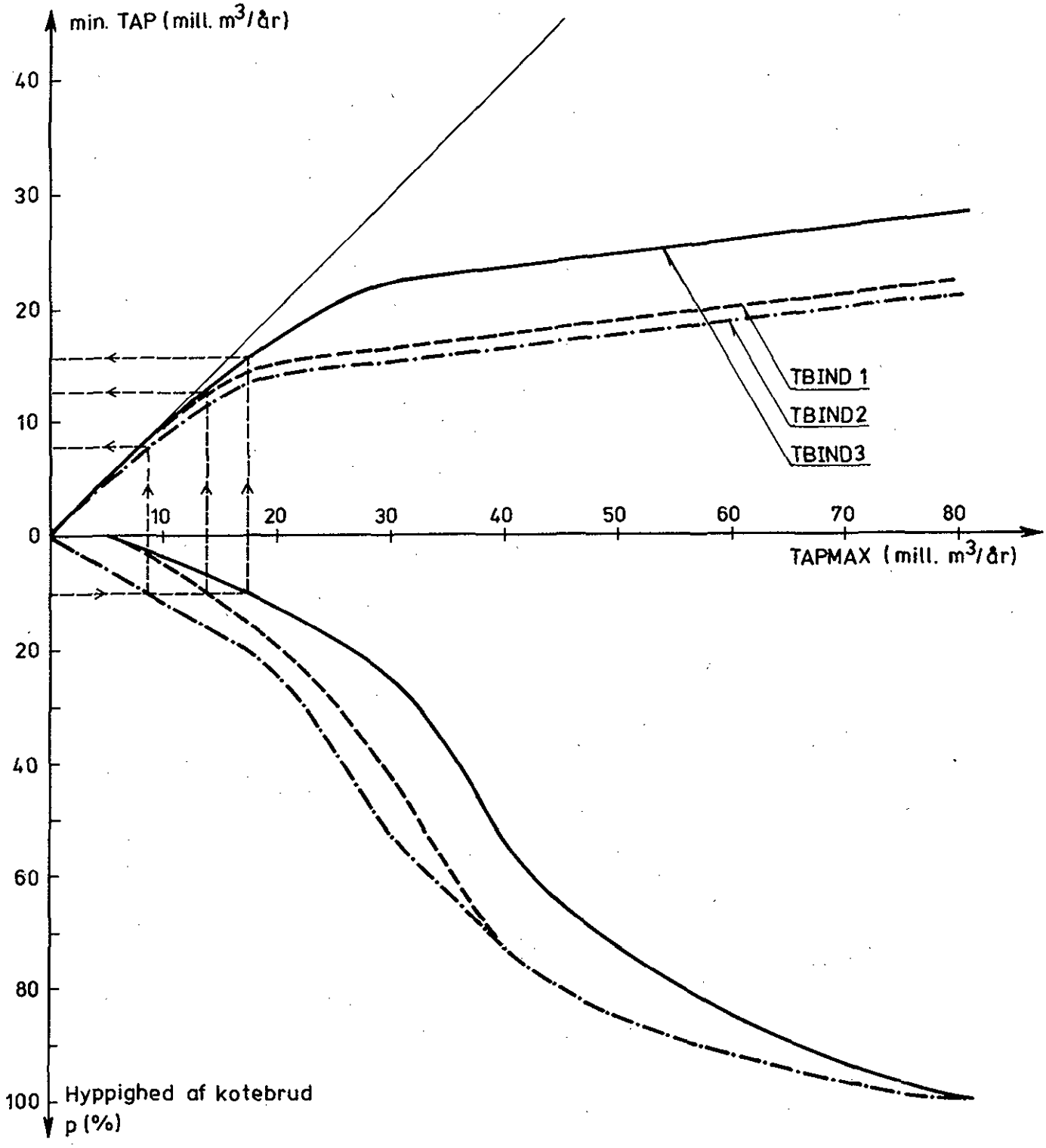
Indstrømningsserie TBIND3

HMAX	OPPUMP (mill. m^3/år)	TAPMAX (mill. m^3/år)	gns TAP (mill. m^3/år)	min Tap (mill. m^3/år)	gns LTØR (dage)	max LTØR (dage)	min KOTE i forhold til 6,50 m (m)	KOTEBRUD p (%)	gns L (dage)	max L (dage)
8.00	10	20	20.0	20.0	86	265	0.64	0	0	0
8.00	10	40	39.4	32.1	195	300	-0.04	12	49	73
8.00	10	60	54.3	38.6	226	313	-0.04	77	45	130
8.00	40	20	19.8	17.3	134	378	-0.59	15	29	49
8.00	40	40	37.2	23.7	230	386	-1.39	54	48	150
8.00	40	60	48.9	26.1	255	391	-1.51	85	81	208
10.00	10	20	20.0	20.0	86	265	2.76	0	0	0
10.00	10	40	40.0	40.0	196	305	1.33	0	0	0
10.00	10	60	59.9	57.0	236	335	-0.02	12	9	18
10.00	40	20	20.0	20.0	134	382	1.51	0	0	0
10.00	40	40	39.8	36.9	248	658	-0.40	12	19	29
10.00	40	60	57.6	44.4	328	690	-1.12	27	54	96

Tabel 7.5.4 Konsekvensberegninger af de hydrologiske konsekvenser af en vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø for perioden 1950-75. De anvendte betegnelser er forklaret i afsnit 7.3.



Figur 7.5.1 Den minimale årlige tapning samt hyppigheden af kotebrud i perioden 1950-75 som funktion af tapningspolitikken TAPMAX. Forudsætninger: HMAX = 8.00 m, QMIN = 0.500 m^3/s, ingen nedpumpning til grundvandsmagasinet.



Figur 7.5.2 Den minimale årlige tapning samt hyppigheden af kotebrud i perioden 1950-75 som funktion af tapningspolitikken TAPMAX. Forudsætninger: HMAX = 8.00 m, QMIN = 0.500 m^3/s, nedpumpning af 30 mill. m^3 vand pr. år til grundvandsmagasinet.

Af figurerne kan man f.eks. se følgende: Såfremt en kotebrudshyppighed på p = 10% accepteres, giver det ved de 3 alternative reservoirpolitikker i Haraldsted-Gyrstinge Sø følgende vandindvindingsmuligheder:

A: Ingen nedpumpning til grundvandsmagasinet, jfr. figur 7.5.1.
TBIND1: p=10%⇒TAPMAX=29.5 mill.m^3/år⇒min TAP=25 mill.m^3/år
TBIND2: p=10%⇒TAPMAX=26.5 mill.m^3/år⇒min TAP=22 mill.m^3/år
TBIND3: p=10%⇒TAPMAX=37.5 mill.m^3/år⇒min TAP=31 mill.m^3/år

B: Nedpumpning af 30 mill. m^3/år til grundvandsmagasinet, jfr. figur 7.5.2.
TBIND1: p=10%⇒TAPMAX=14.0 mill.m^3/år⇒min TAP=13 mill.m^3/år
TBIND2: p=10%⇒TAPMAX= 8.5 mill.m^3/år⇒min TAP= 8 mill.m^3/år
TBIND3: p=10%⇒TAPMAX=17.5 mill.m^3/år⇒min TAP=16 mill.m^3/år

Det skal nævnes, at ovenstående alternative muligheder giver forskellige konsekvenser, hvad angår f.eks. min KOTE og max LTØR.

Af generelle konklusioner kan følgende fremhæves:

- TBIND1 contra TBIND2. En overførsel af vand fra Tystrup-Bavelse Sø til Frøsmose Å i månederne december-april på ialt 10 mill. m^3/år forbedrer både vandindvindingsmulighederne og recipientforholdene i Haraldsted-Gyrstinge Sø, samtidig med at de flerårige uafbrudte perioder med en vandføring på 170 l/s i Ringsted Å nu afbrydes hvert år, se tabel 7.5.1. For Tystrup-Bavelse Sø's vedkommende ses en sådan vandoppumpning ikke at have helt så stor betydning, idet vandindvindingsmulighederne og recipientforholdene her kun forværres lidt i forhold til forbedringerne i Haraldsted-Gyrstinge Sø. Dette hænger sammen med, at Tystrup-Bavelse Sø har så lille magasineringsevne i forhold til indstrømningen, at magasinet altid bliver fyldt op om vinteren.

- TBIND2 contra TBIND3. De to hertil hørende reservoirpolitikker ses, jfr. tabel 7.5.1, at have stort set de samme konsekvenser for Haraldsted-Gyrstinge Sø. Det ses endvidere, at den større vandudledning til Ringsted Å ved TBIND3 betyder større vandindvindingsmuligheder ved Tystrup-Bavelse Sø. Således forbliver de samlede indvindingsmuligheder fra de to søsystemer konstante, hvad enten vandmængderne i Haraldsted-Gyrstinge Sø benyttes til direkte vand-

indvinding eller til at forøge sommervandføringerne i Ringsted Å, hvorved indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø forøges, og en ekstra vandindvinding herfra kan foretages. Såfremt der foretages vandindvinding fra både Haraldsted-Gyrstinge Sø og Tystrup-Bavelse Sø, kan recipientforholdene i Ringsted Å således forbedres væsentligt, uden at de samlede vandindvindingsmuligheder herved forringes.

- OPPUMP fra Tystrup-Bavelse Sø til grundvandsmagasinet. I kapitel 5 forudsættes en nedpumpning af vand fra Tystrup-Bavelse Sø til grundvandsmagasinet i 5 af årets måneder, hvorefter der er foretaget nærmere undersøgelser af grundvandsmagasinets respons herpå samt mulighederne for på denne måde at forøge grundvandsindvindingen. Her er blot set på mulighederne for og konsekvenserne af en sådan oppumpning fra Tystrup-Bavelse Sø.

Ved en koordineret overfladevands- og grundvandsindvinding, hvor der foretages både direkte overfladevandsindvinding og nedpumpning af overfladevand til grundvandsmagasinet, er de hydrologiske forudsætninger for en forøget nettovandindvinding til stede. Betragtes f.eks. beregningseksemplet på figurerne 7.5.1 og 7.5.2 og forudsættes som beregnet i kapitel 5, at udnyttelsesgraden for det nedpumpede vand er på 85%, ses det, at en nedpumpning på 30 mill. m^3/år kan give en forøget grundvandsindvinding på 25.5 mill. m^3/år, men til gengæld en formindsket vandindvinding direkte fra Tystrup-Bavelse Sø på ca. 15 mill. m^3/år.

Det skal dog bemærkes, at svarende til én bestemt kotebrudshyppighed p vil en kombination af oppumpning og tapning med en reservoirpolitik som skitseret i afsnit 7.3 give større vandspejlsvariationer og længere uafbrudte perioder med minimumsudledning fra søen end en tapning alene, se f.eks. tabel 7.5.4 og sammenlign (HMAX = 10.00, OPPUMP = 10, TAPMAX = 60) med (HMAX = 10.00, OPPUMP = 40, TAPMAX = 40).

I ovenstående beregninger er der ikke taget hensyn til, at en nedpumpning af vand til grundvandsmagasinet sammen med en grundvandsindvinding vil påvirke indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø. Det ville have været muligt at tage hensyn hertil ved at sammenkoble overfladevands- og grundvandsmodellen.

RESUME OG KONKLUSIONER

1. Der er udarbejdet en matematisk-numerisk grundvandsmodel for det paleocæne grønsands-/grønsandskalkreservoir i Suså-Vendebæk-området (kap. 1). Modellen er anvendelig i andre områder med såvel artesisk som frit magasin.

2. Ved brug af modellen kan trykniveauets variationer i tiden såvel som i stedet beregnes som funktion af givne indgreb på basis af kendskab til grundvandsreservoirets hydrauliske parametre T og S, ind-/udsivningsforholdene langs modelområdets begrænsninger samt nedsivningsforholdene inden for området indbefattet en eventuel vandudveksling med vandløb.

3. I forbindelse med opbygningen af modellen, herunder en uafhængig fastlæggelse af talværdier for de indgående geohydrauliske parametre samt af modellens randvilkår, er det overordentlig vigtigt at udnytte eksisterende geologiske og geohydrologiske data (kap. 1.5). Dette gælder ikke mindst eventuelle eksisterende prøvepumpningsdata fra området.

4. Der er peget på muligheden af at lokalisere eventuelle nedsivningsområder med vandafgivelse fra højereliggende sekundære vandforekomster til det primære grundvandsmagasin på basis af de observerede amplituder i trykniveauets årstidsvariationer i det primære magasin (kap. 1.5.3.6). Amplitudernes stedlige variation samt nedsivningsområdernes placering er vist på bilag 6 og 8.

5. Det er demonstreret, hvorledes kalibreringen af grundvandsmodellen kan anvendes til en endelig fastlæggelse af de hydrauliske parametre samt vurdering af grundvandsmagasinets vandudveksling med omgivelserne, herunder nedsivningens stedlige og tidslige variation på grundlag af foreliggende observationer af trykniveauets stedlige og tidslige variation (kap. 1.5.5). På bilag 7 og 8 er vist de endelige resultater af kalibreringskørslerne med modellen.

6. Der er opbygget en matematisk model til simulering af vandløbsafstrømning (kap. 2.3). Modellen er baseret på hydrologisk-fysiske principper og er demonstreret at være generelt anvendelig i hvert fald for danske forhold. Den fysiske betydning af de i modellen indgående parametre er beskrevet.

7. Som inddata til afstrømningsmodellen kræves meteorologiske tidsserier i form af daglige værdier for nedbør, temperatur og potentiel fordampning. På grundlag heraf simulerer afstrømningsmodellen de tidslige variationer af vandløbsafstrømningen og giver samtidig informationer om de tidslige variationer af andre komponenter i det hydrologiske kredsløb, f.eks. rodzonens fugtighedsindhold, den aktuelle fordampning samt grundvandsdannelsen.

8. Ved tilpasning af afstrømningsmodellen på et konkret afstrømningsområde benyttes en automatisk kalibreringsrutine til fastlæggelse af de i modellen indgående parametre. Som numerisk kriterium i forbindelse med kalibreringen benyttes en minimering af summen af kvadratafvigelserne mellem de simulerede og de observerede vandføringsserier.

9. Variationer i talværdierne for modelparametrene i forskellige afstrømningsområder kan i vid udstrækning korreleres med forskelle i områdernes geologisk/hydrologiske karakteristika.

10. Kalibrering af afstrømningsmodellen på 8 deloplande i Suså-systemet har givet gode resultater i sammenligning med kalibreringer på andre vandløbsoplande (kap. 2.4.3). Desværre har der for de fleste af deloplandene i Suså-området kun været vandføringsdata til rådighed for én 2-årig periode, hvilket er en ret kort kalibereringsperiode. Det ville desuden have været ønskeligt med en uafhængig testperiode, på hvilken simulerede data havde kunnet sammenlignes med observerede data, uden at disse havde dannet grundlag for fastlæggelsen af modelparametrene.

11. Samspillet mellem overfladevand og grundvand indtager en betydningsfuld rolle for de hydrologiske forhold i Suså-området og dermed for opbygningen af såvel grundvands- som afstrømningsmodellen.

12. Det er demonstreret, at der adskillige steder langs Susåen og dens sidetilløb sker en optrængning af grundvand fra det primære magasin, mens der andre steder sker en nedsivning. På tilsvarende måde er områder med hydraulisk kontakt mellem sekundære og primære grundvandsforekomster påvist (kap. 3).

13. Op/nedsivningen er i grundvandsmodellen talmæssigt beskrevet ved på de relevante lokaliteter, d.v.s. i de relevante polygoner i modellen, at antage en vandudveksling, som varierer lineært med trykniveauforskellen mellem det primære grundvandsmagasin på den ene side samt vandløb og sekundære grundvandsforekomster på den anden.

14. I en bestræbelse på beregningsmæssigt at simulere de naturlige uforstyrrede årstidsfluktuationer i det primære grundvandsmagasin i konsekvens af en årstidsvariabel nedsivning er der forsøgt en sammenkobling af grundvandsmodel og overfladevandsmodel på en sådan måde, at den af overfladevandsmodellen beregnede tidslige variation af grundvandsnedsivningen benyttes som inddata til grundvandsmodellen (kap. 3.3).

15. Til illustration af, hvorledes matematiske hydrologiske modeller med fordel kan anvendes i forbindelse med vurderinger af de hydrologiske konsekvenser af forskellige former for udnyttelse af vandressourcer, er der gennemført en række konkrete beregninger i relation til en øget vandindvinding i Suså-området.

16. Konsekvenserne af en øget grundvandsindvinding i Suså-Vendebæk-området er søgt vurderet under anvendelse af grundvandsmodellen. Det fremgår af de gennemførte beregninger, (kap. 4, bilag 10 og 11), at de opnåede resultater i meget høj grad afhænger af de forudsætninger, der gøres om lækageforholdene i området samt om det primære grundvandsmagasins vandudveksling med vandløb og omgivende grundvandsreservoirer. Der er et betydeligt behov for at få etableret et sikrere grundlag for de gjorte forudsætninger.

17. Med forbehold som følge af usikkerhed i forbindelse med de opstillede forudsætninger om lækage og vandudveksling med omgivelserne må det ud fra de gennemførte beregninger konkluderes, at en grundvandsindvinding på 21 mill. m^3/år i Suså-Vendebæk-området vil medføre:

1) Sænkninger omkring kildepladserne på 8-12 meter.
2) En formindskelse af Susåens vandføring nedstrøms for Broksø, så vandløbet på visse strækninger i sommermånederne kan udtørre.

3) Relativt lille påvirkning af området omkring kildepladserne til det eksisterende Regnemarkværk. Den her inducerede lækage vil være lille i forhold til den allerede frembragte.

4) Sandsynligvis vil også oplande til tilgrænsende vandløbssystemer blive påvirket af indvindingen. Det drejer sig her i første række om Køge Å og Tryggevælde Å's oplande øst for modelbegrænsningen. Simuleringerne antyder, at den samlede påvirkning kan blive på op til 5-6 mill. m^3/år.

18. Der er gennemført en vurdering af i vinterhalvåret at foretage nedpumpning af overfladevand til det primære grundvandsmagasin med henblik dels på at reducere de negative konsekvenser af en grundvandsindvinding på sommervandføringen i områdets vandløb dels på at øge det beløb, der lader sig oppumpe som grundvand jævnt fordelt over hele året (kap. 5). De hydrologiske konsekvenser er beregnet under anvendelse af den opstillede grundvandsmodel (bilag 12).

19. Med forbehold som følge af usikkerhed i de opstillede forudsætninger kan det konkluderes,

1) at det hovedsageligt på grund af grundvandsmagasinets artesiske karakter formentlig ikke lader sig gøre ved det ovenfor omtalte nedpumpningsarrangement at forbedre forholdene væsentligt for vandløb og lækageområder i den kritiske periode om sommeren,

2) at det taget over en længere årrække kan få positiv betydning for de sekundære grundvandsforekomster (opadgående lækage), at der foretages en nedpumpning, dersom der ikke i de berørte nedsivningsområder kan opretholdes en naturlig årlig nedsivning svarende til det beregningsmæssigt forudsatte på maksimalt 200 mm/år,

3) at ca. 85% af det i vintermånederne nedpumpede overfladevand kan indvindes i forbindelse med en grundvandsindvinding, som er jævnt fordelt over hele året, uden at påvirkningerne på de tilgrænsende grundvandsreservoirer vil overskride det til en vandindvinding på 21 mill. m^3/år uden nedpumpning svarende. Derimod vil de resul-

terende trykniveauvariationer over året i tilfælde af store nedpumpningsmængder blive betydelige, ligesom det vil vise sig, at vandløbene i området i sommermånederne vil miste betydelige vandmængder og hermed ofte tørlægges. Denne sidstnævnte effekt kan man naturligvis tænke sig at begrænse gennem i de kritiske måneder at foretage en udpumpning direkte i vandløbene af en del af det indvundne grundvand.

19. De hydrologiske konsekvenser af en overfladevandsindvinding fra Haraldsted-Gyrstinge Søerne er søgt vurderet i afhængighed af indvindingens omfang samt af den benyttede tapnings- og udledningspolitik. Koteforholdene i søerne samt udstrømningen fra søerne til Ringsted Å er af særlig interesse. Den ovenfor omtalte afstrømningsmodel har været et uundværligt hjælpemiddel i den forbindelse (kap. 6).

20. Af konklusioner i forbindelse med overfladevandsindvinding fra Haraldsted-Gyrstinge Søerne kan nævnes:

1) Dersom man forsøger at indvinde 15 mill. m^3/år svarende til Københavns Vandforsynings nuværende indvindingsret, og dersom man samtidig ønsker at overholde et af landvæsenskommissionen fastsat udledningskrav på 170 l/s til Ringsted Å, viser beregningerne, at man i gennemsnit hvert 3. år vil begå brud på de fastsatte minimumskotekriterier i søerne med en gennemsnitlig underskridelsesperiode på 1½ måned.

2) Med den forudsatte tapningspolitik vil der desuden med en middeltidsafstand på 26 år forekomme situationer med uafbrudt underskridelse af minimumskoterne i 4-5 måneder samtidig med, at det kun er muligt at indvinde ca. 9 mill. m^3/år og samtidig med, at der i sammenhængende perioder på næsten 2 år ad gangen kun udledes 170 l/s til Ringsted Å.

3) De kritiske situationer med kotebrud, manglende tappemuligheder m.v. er ikke forårsaget af et enkelt særlig tørt år, men derimod af flere på hinanden følgende år med en lille afstrømning, således at magasinerne ikke når at blive fyldt op hver vinter.

21. På basis af en opstillet vandbalancemodel for Tystrup-Bavelse Sø samt målte og simulerede vandtilstrømninger er der gennemført beregninger af de hydrologiske konsekvenser af alternative kombinationer af overfladevandsindvinding, nedpumpning af vand til et grundvandsmagasin samt overførsel af vand til Haraldsted-Gyrstinge Søerne via Frøsmose Å (kap. 7).

22. Af konklusioner i forbindelse med vandindvinding fra Tystrup-Bavelse Sø kan nævnes:

1) En overførsel af vand fra Tystrup-Bavelse Sø til Gyrstinge Sø via Frøsmose Å i månederne december-april på ialt 10 mill. m^3/år bevirker en betydelig forbedring af vandindvindingsmulighederne i Haraldsted-Gyrstinge Søerne og af afstrømningsforholdene i Ringsted Å. De flerårige uafbrudte perioder med en vandføring på 170 l/s vil således forsvinde. For Tystrup-Bavelse Sø's vedkommende vil en sådan overførsel af vand ikke have den helt store betydning, hvad angår vandindvindingsmuligheder og recipientforhold. Dette hænger sammen med, at Tystrup-Bavelse Sø med sit lille magasin i forhold til indstrømningen altid bliver fyldt op om vinteren.

2) Ved en koordineret overfladevands- og grundvandsindvinding, hvor der foretages både direkte overfladevandsindvinding og kunstig nedpumpning af overfladevand til et grundvandsmagasin, er de hydrologiske forudsætninger for en øget nettovandindvinding til stede, idet den mulige øgning i grundvandsindvindingen som følge af nedpumpningen er større end den resulterende formindskelse i overfladevandsindvindingen som følge af, at en del af overfladevandet i vintermånederne nedpumpes til grundvandet.

23. For indstrømningen til Tystrup-Bavelse Sø er der opstillet en stokastisk model baseret på ugeværdier. Den stokastiske model er efter kalibrering på grundlag af det foreliggende historiske datamateriale benyttet til at generere mulige fremtidige indstrømningsforløb til Tystrup-Bavelse Sø. Dette muliggør en mere realistisk vurdering af sandsynligheden for, at f.eks. det fremtidige søvandspejl vil falde under et kritisk niveau, eller at det fremtidige afløb fra søen underskrider en bestemt værdi.

LITTERATURLISTE

[1] Thomas, R.G. (1973). Groundwater models. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Irrigation and Drainage Paper 21.

[2] Stang, O. og Gosk, E. (1976). En numerisk grundvandsmodel for Suså-Vendebæk området. Eksamensprojekt, ISVA, DtH.

[3] Københavns Vandforsyning (1959). Beretning om de af Københavns Vandforsyning foretagne undersøgelser ved Regnemark.

[4] Andersen, L.J. og Nielsen, K. Ambo (1976). Rapport over hydrologi, prøvepumpning, indvindingsmuligheder og følgevirkninger i Suså-Vendebæk-området. DGU.

[5] Rosenbeck, E. (1974). Rapport over de hydrologiske og hydrokemiske forhold i Ringsted-Haslev-området samt vandindvindingsmulighederne i Tolstrup-området baseret på prøvepumpningsforsøg. DGU.

[6] Jacob, C.E. and Lohman, S.W. (1952). Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Trans. A.G.U. Vol. 33, No. 4.

[7] Vestsjællands Amtskommune, Vandinspektoratet (1975). Vandforsyningsanlæg og vandforbrug.

[8] Nielsen, S.A., and Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. Nordic Hydrology, 4, pp. 171-190.

[9] Dahl, S.Ø. (1976). Matematisk nedbør-afstrømningsmodel HBV-2. Rapport fra individuelt kursus, ISVA, DtH.

[10] Schou, K. og Søndergaard, N. (1975), Optimering af afstrømningsmodel. Rapport fra afløsningsopgave, Numerisk Institut, DtH.

[11] Hansen, L. og Pedersen, E. Frimodt (1975). Drænvandsundersøgelser 1971-74. 1247. Beretning fra Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur.

[12] Refsgaard, J.C. (1976). Minimumsvandføringer i vandløb. Eksamensprojektrapport, ISVA, DtH.

[13] Københavns Vandforsyning (1965). Redegørelse for nogle på Københavns Vandforsynings foranledning foretagne hydrometriske, fysiske, kemiske, bakteriologiske og biologiske undersøgelser i anledning af påtænkte anlæg for indvending af overfladevand fra Haraldsted og Gyrstinge Søer i forbindelse med vandværket ved Regnemark.

[14] Hansen, E. (1971). Analyse af hydrologiske tidsserier. Polyteknisk Forlag.

[15] Fleming, G. (1975). Computer simulation techniques in hydrology. Elsevier.

[16] Storstrøms Amtskommune og I. Krüger A/S (1976). Vandplanlægning i Storstrøms Amtskommune. 1. etape.

[17] I. Krüger A/S: Næstved kommune. Vandværket ved Pindsobro. Prøvepumpninger 1971
Næstved kommune: Området ved Tybjerglille Prøvepumpninger 1970-71.

[18] Walton, W.C. (1970). Groundwater resource evaluation. McGraw-Hill.

[19] Prickett, T.A. and Lonnquist, C.G. (1971). Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois State Water Survey. Bulletin 55.

[20] Stendal, M.M. (1977) Dansk deltagelse i det internationale hydrologiske program. Vand nr. 3. aug. 1977.

APPENDIX I

MIDTSJÆLLANDSUNDERSØGELSEN

Oversigt over boringer med KV bor nr. / DGU Ark. nr.

441 / 206.46	796 / 211.58	1142 / 212.302
447 / 212.52	797 / 211.59	1143 / 212.303
455 / 212.48	937 / 211.60	1144 / 212.315
458 / 212.51	938 / 212.167	1145 / 212.316
489 / 206.55	944 / 212.170	1146 / 212.248
490 / 212.56	945 / 212.168	1147 / 212.317
491 / 211.18	952 / 212.169	1148 / 212.318
492 / 212.57	974 / 212.217	1149 / 212.319
495 / 205.14a	993 / 222.120	1150 / 212.320
496 / 211.19	994 / 217.206	1151 / 212.321
506 / 212.54	1104 / 212.236	1152 / 212.322
507 / 212.53	1105 / 212.237	1153 / 212.314
509 / 212.55	1108 / 211.80	1154 / 212.313
643 / 206.104	1109 / 211.81	1155 / 212.329
692 / 211.63	1110 / 211.87	1156 / 212.333
728 / 212.99	1114 / 211.92	1157 / 212.348
753 / 212.100	1116 / 211.90	1158 / 212.328
755 / 212.96	1117 / 211.85	1159 / 212.332
757 / 212.97	1118 / 211.88	1160 / 212.330
758 / 212.98	1119 / 211.89	1161 / 212.327
760 / 211.35	1120 / 212.263	1162 / 211.127
765 / 211.34	1121 / 212.268	1163 / 206.452
766 / 211.32	1122 / 211.95	1164 / 212.334
767 / 211.36	1123 / 211.94	1166 / 212.337
768 / 216.92	1124 / 211.98	1168 / 211.130
769 / 216.93	1125 / 212.283	1169 / 212.338
770 / 217.158	1126 / 212.284	1174 / 212.375
771 / 217.160	1127 / 212.294	1175 / 212.376
772 / 217.159	1128 / 212.293	1176 / 212.378
773 / 217.258	1130 / 212.295	1178 / 216.227
774 / 217.161	1133 / 212.298	1179 / 217.243
776 / 217.163	1134 / 212.300	1180 / 217.242
777 / 221.278	1136 / 211.102	1181 / 217.262
779 / 211.40	1137 / 212.301	1182 / 217.260

1183 / 217.257
1184 / 212.249
1185 / 212.401
1186 / 212.395
1187 / 217.261
1188 / 212.400
1190 / 212.399
1191 / 212.443
1192 / 212.289
1192b / 212.311
1193 / 212.260
1194 / 212.286
1195 / 212.398
1196 / 212.396
1197 / 212.250
1198 / 212.397
1199 / 212.405
1200/2 / 212.507
1200/3 / 212.508
1201 / 206.487
1202 / 212.267
1203 / 212.285
1208 / 217.221
1209 / 217.165
1210 / 216.248
1211 / 216.249
1212 / 217.276
1213 / 217.277
1214 / 217.275
1215 / 216.273
1216 / 211.143
1217 / 211.146
1220 / 217.325
1221 / 217.324
1222 / 217.336
1223 / 216.274
1224 / 212.527
1225 / 216.271
1226 / 216.270
1227 / 216.272
1228 / 211.153
1229 / 216.277
1298 / 217.472
1299 / 217.374
1315 / 217.379
1316 / 217.380
1317 / 216.339
1318 / 216.359
1319 / 217.427
1327 / 217.428
1332 / 217.453
1333 / 217.454
1334 / 216.390
1335 / 217.455
1336 / 217.462
1337 / 212.785
1338 / 217.509
1339 / 217.510
1340 / 217.511
1341 / 211.437
1342 / 216.442
1343 / 216.428
1344 / 211.385
1345 / 216.529
1346 / 216.525
1347 / 217.613
1348 / 221.857
1350 / 216.528
1351 / 216.530
1352 / 216.531
1353 / 216.527
1354 / 216.523
1355 / 216.522
1356 / 216.521
1357 / 216.524
1358 / 211.435

APPENDIX II

Det Internationale Hydrologiske Program. (IHP)

I efteråret 1972 vedtog UNESCO at iværksætte et hydrologisk langtidsprogram, som en videreførelse af den Internationale Hydrologiske Decade (IHD). Det nye Internationale Hydrologiske Program (IHP) har som overordnet målsætning at frembringe det bedst mulige grundlag for en rationel og optimal udnyttelse af de disponible vandressourcer.

Det danske bidrag til IHP forestås af Dansk Komite for Hydrologi (DKH), der er nedsat af Planlægningsrådet for Forskningen. DKH har som undersøgelsesområde udvalgt Susåens opland, for hvilke der er udarbejdet et undersøgelsesprogram, der forventes gennemført inden for en 5-årig periode.

Undersøgelsesprogrammet består af en række delprojekter omfattende undersøgelser over:

1.1.1. Nedbør

Projektet tjener til bestemmelse af den tids- og arealmæssige variation af nedbøren. Hertil etableres 5 nedbørstationer med 2 kontinuert registrerende nedbørmålere på hver station. Af hensyn til fortsatte undersøgelser vedrørende nødvendige korrektioner for vindeffekt måles i såvel 1,2 m højde som i terrænhøjde.

1.1.2. Evapotranspiration

Projektet tjener til bestemmelse af den tids- og arealmæssige variation af den aktuelle evapotranspiration, samt til at søge dens afhængighed af klima, vegetation og jordtype bestemt og formuleret i en matematisk model. Til dette formål gennemføres for et mindre udvalgt område en detaljeret klimaundersøgelse for karakteristiske vegetationer, hvorfra potentiel og aktuel evapotranspiration bestemmes. Endvidere etableres på hver nedbørstation et evaporimeter til måling af potentiel evapotranspiration med henblik på bestemmelse af den arealmæssige evapotranspiration.

1.1.3. Nedsivning, infiltration

Projekter skal tjene til at opnå en af nedbør-, afstrømnings- og

grundvandsstandsmålinger uafhængig bestemmelse af nedsivningen samt til at opnå en øget indsigt i vandbevægelsen i den umættede zone med henblik på at konstruere en matematisk model af vandtransporten gennem denne zone. Til dette formål gennemføres i området på lo udvalgte repræsentative boringslokaliteter tritiumprofilmålinger på basis af udtagning af jordprøver ned gennem jordlagene over grundvandzonen.

1.2.1. Grundvand

Målet med dette projekt er at opbygge en model for grundvandsmagasinets reaktion overfor påvirkninger udefra f.eks. i form af nedsivning samt op- eller nedpumpning. Modellen opstilles under hensyntagen til grundvandsstrømningers dynamik samt grundvandsmagasinets geologiske, hydrologiske og fysiske forhold. Med det nuværende kendskab til områdets geologi kan det vise sig nødvendigt at opbygge modellen som en flerlagsmodel.

Det er af særlig interesse, at modellen skal muliggøre beregning af ændringer i vandløbsafstrømningens grundvandsbidrag i konsekvens af foretagne indgreb. Grundvandsmodellen tjener endvidere til vurdering af mulighederne for gennem nedpumpning at udnytte grundvandsmagasinet som reservoir for overfladevand, som ellers ville strømme direkte overfladisk af til havet.

1.2.2. Vandløbsafstrømning

Det er målet med projektet at opbygge, videreudvikle og tilpasse matematiske modeller til numerisk simulering af vandløbsafstrømningen der finder sted ved nedbørens passage gennem jordlagene til vandløbene. Der vil i den udstrækning det skønnes nødvendigt blive arbejdet med tidsskridt helt ned til 1 time. Nedbør- og evapotranspirationsprojekterne leverer vigtige inddata til dette projekt især hvad angår nedbørmængde og simulering af aktuel evapotranspiration. Projektet er i det hele taget knyttet nært til en række andre projekter som følge af sin integrerede behandling af de enkelte elementer i vandbalancen.

1.2.3. Systematisk kemisk undersøgelse af grundvand, overfladevand og suspenderet stof i vandløbene samt bestemmelse af vandløbenes stoftransport.

Formålet med dette projekt er at registrere vandkvalitetens natur-

lige variation og de eventuelle ændringer heri. Derudover er det målet gennem analyse af udvalgte naturlige sporstoffer, der forekommer i grundvandet og overfladevandet at opnå et kvantitativt udtryk for grundvandstilførslerne til vandløbene. Projektet danner endvidere grundlag for vurderinger af ændringer i grundvandets og overfladevandets kvalitet som følge af nedpumpning af overfladevand til grundvand.

2.1.1. Grundvandsindvindingens indflydelse på afstrømningen

I forbindelse med dette projekt udføres målinger, der kan give oplysninger, dels om størrelsen og fordelingen af grundvandstilstrømningen til vandløbene under de nuværende forhold, dels om sammenhængen mellem denne tilstrømning til vandløbene og forholdene i grundvandsmagasinet. Disse forhold undersøges primært ved, at der i tørre perioder udføres samtidige målinger af vandføring og vandstand i vandløbene samt af grundvandspotentialerne i nærheden af vandløbene. Vandføringsmålingerne suppleres med målinger af vandtemperaturen samt med kemiske analyser for eventuelle naturlige sporstoffer i grundvandet.

2.1.2. Søers udnyttelse som reguleringsmagasiner

Det er projektets mål at opbygge en simuleringsmodel, der på grundlag af en fastlagt overfladevandindvinding i forbindelse med praktisk mulige reguleringskriterier for afløbet fra Tystrup Sø kan foretage beregninger af de involverede risici for enten uacceptabelt store vandspejlsvariationer i søen eller uacceptabelt små minimumsafstrømninger fra søen i konsekvens af den fastlagte overfladevandindvinding og reguleringskriteriet for afløbet. Til dette formål er det nødvendigt, at der udarbejdes en stokastisk simuleringsmodel for tilstrømningen til Tystrup Sø.

2.1.3. Drænvandskvantitet og -kvalitet

Projektet tjener til at erhverve større viden om drænvandsafstrømningens mængde og kvalitative forhold. Målingerne er dels af betydning for konstruktion af modeller for udvaskning af næringssalte fra landbrugsarealer dels for konstruktion af modellen af vandløbsafstrømning.

2.2.1. Grundvandsmagasinernes udnyttelse som reguleringsmagasiner for overfladevand

Målet med projektet er at undersøge mulighederne for på lige fod med naturlige og kunstige søer at udnytte grundvandsmagasiner som reservoirer for overfladevand. Dette kan ske ved direkte nedpumpning gennem boringer af overfladevand i perioder med rigelig tilgang af overfladevand for derefter af kunne foretage en forøget oppumpning fra grundvandsmagasinerne. Projektet skal belyse såvel de hydrologiske som de hygiejniske og kemiske virkninger af tilledning af overfladevand til grundvandsmagasinet. Til dette formål udføres en forsøgsnedpumpning af overfladevand gennem en boring. Nedpumpningens varighed vil være 2-4 uger og vandprøver udtages fra nærliggende boringer.

2.2.3. Integreret vandplanlægning

Projektet omfatter system- og operationsanalytiske studier af mulighederne for at opnå en rationel og optimal udnyttelse af de disponible vandressourcer i området under hensyntagen til, at givne kvalitetskrav i forbindelse med søers og vandløbs udnyttelse som recipienter for spildevand skal overholdes og under hensyntagen til, at der etableres en afstemt indvinding af overfladevand og grundvand.

Dette projekt kan på flere måder opfattes som den sammenfattende ramme omkring en lang række af de foregående projekter, idet disse tænkes at skulle bidrage med de nødvendige delrelationer.

I nedenstående tabel er vist hvilke institutioner der deltager i udførelsen af de enkelte delprojekter.

Institution	Delprojekt
Danmarks geologiske Undersøgelse	1.1.3.,1.2.1.,1.2.3.,2.2.1.
Det danske Hedeselskab	1.2.2.,2.1.1.,2.1.2.,2.1.3. 2.2.3.
Det danske Meteorologiske Institut	1.1.1.
Hydroteknisk Laboratorium	1.1.2.
Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole	
Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning	1.2.1.,1.2.2.,2.1.1.,2.1.2. 2.2.3.
Danmarks tekniske Højskole	
Isotopcentralen, A. T. V.	1.1.3.
Københavns Vandforsyning	2.2.1.
Vandkvalitetsinstituttet A.T.V.	2.2.3.

De samlede udgifter til projektets gennemførelse andrager 8,6 mill. kr. fordelt på finansårene 1977/78 - 1981. Heraf afholder miljøstyrelsen, Statens jordbrugs- og veterinærvidenskabelige Forskningsråd, Statens naturvidenskabelige Forskningsråd, Statens teknisk videnskabelige Forskningsråd samt Teknologirådet i alt 6,1 mill. kr., mens det resterende beløb 2,5 mill.kr. afholdes af de institutioner, der forestår gennemførelsen af de enkelte delprojekter.

Projektet er igangsat pr. 1. juli 1977 og der er for finansåret 1977/78 bevilliget 936.000 kr. til dets start.

IHP-programmet viderefører således det undersøgelsesarbejde, der er påbegyndt med miljøstyrelsens undersøgelser over øget vandindvindings hydrologiske og økologiske effekter i Susåens opland.

ISSN 0105-3094

Fu 00-91

SCANTRYK, KBHVN
TELEFON 01-30 06 01

Pris: kr. 120,-
Incl. kortbilag og moms